

АКУСТИКО-СЕЙСМИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАПУСКОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ ДЛЯ КООПЕРАТИВНОГО РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ АТАК

Юрген Алтман

Для того, чтобы заполнить пробелы в российской системе раннего предупреждения, можно будет кооперативно разместить датчики вблизи шахт межконтинентальных баллистических ракет (МБР), которые будут регистрировать запуск и непрерывно передавать информацию о том, что никакого запуска не произошло. Исключительно громкий шум от запуска распространяется на километры и может быть обнаружен пассивными средствами при любых погодных условиях по индуцированному движению грунта. Закопанные сейсмические датчики сводят к минимуму насильственное проникновение и помехи над землей. Соображения распространения и акустически-сейсмической передачи, так же как и другие потенциальные источники сильного звука или перемещения грунта, ведут к рекомендации, чтобы датчики ускорения были расположены на расстоянии 0,1 – 1 км от каждой шахты. Системы из трех датчиков позволяют оценить азимут и высоту источника, улучшая дискриминацию от, например, пролетающего выше реактивного самолета. Временной ход амплитуды сигнала, его максимум, и спектральные характеристики предоставляют дополнительную информацию для распознавания запуска и других типов источников. Одна станция будет стоить меньше 50 000 долларов, так что все 800 шахт МБР США и России могут быть снабжены датчиками примерно за 40 миллионов долларов. Развертывание может начаться после этапа разработки и испытаний в течение одного или двух лет. Возможно расширение на мобильные МБР и на другие ядерные державы.

Статья получена 24 февраля 2005 г. и принята к публикации 24 июня 2005 г.

Автор работает на факультете экспериментальной физики III Дортмундского университета, Дортмунд, Германия.

Это исследование финансировалось фондом Плаушер, Сан-Франциско, США. Я хотел бы поблагодарить Фрэнка фон Хиппеля (Принстонский университет) и Стива Феттера (Мэрилендский университет) за побуждение проведения этого исследования, и Дэвида Мошера (Рэнд Корпорейшн) за предоставление литературы.

Посылать корреспонденцию по адресу: Address correspondence to Jürgen Altmann, Experimentelle Physik III, Universität Dortmund, D-44221 Dortmund, Germany.

Адрес электронной почты: altmann@e3.physik.uni-dortmund.de

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение раннего предупреждения

Опасение возникновения ядерной войны от случайного или несанкционированного применения ядерного оружия вызывало беспокойство уже во время холодной войны. Даже хотя после ее окончания вероятность возникновения ядерной войны из военной конфронтации, например, в Европе, практически исчезла, США и Россия все еще обладают большим количеством оружия, которое поддерживается в высокой степени готовности и требует принятия решения в короткое время. В особенности проблематичными являются точные межконтинентальные баллистические ракеты (МБР) в шахтах, которые могут быть нацелены друг против друга.

В 1990-х гг. экономические трудности привели Россию к тому, чтобы держать большую часть своих мобильных ракет в гарнизонах, а атомных подлодок – на своих базах, увеличив их уязвимость к точным американским ракетам, которые постоянно улучшались. Более того, российская система раннего предупреждения существенно ослабела, спутники раннего предупреждения не заменялись по мере необходимости, и большая часть бывших советских радаров была потеряна из-за того, что они оказались за пределами России. Вместе с имеющимся пробелом в радиолокационном покрытии, это привело к тому, что несколько ча-

сов в течение каждого дня Россия не может убедиться в том, начато ли ядерное нападение¹. В потенциальном будущем кризисе это может увеличить нервозность, и то же самое может произойти сейчас, если появятся ошибочные указания на нападение без возможности двойной проверки. Несколько ложных тревог во время холодной войны, так же как и после нее, показывают, что может случиться в таком случае².

Одним из способов сокращения риска непреднамеренной ядерной войны является увеличение времени для принятия решения о возможной контратаке посредством уменьшения статуса готовности ядерных ракет³. существуют также предложения о помощи России в улучшении ее систем раннего предупреждения⁴.

В недавнем подробном исследовании американской корпорации РЭНД было отождествлено три типа сценариев случайного или несанкционированного применения ядерного оружия: (а) несанкционированный запуск (неконтролируемым командиром или террористом), (б) запуск по ошибке (из-за аварии во время тренировки или неисправности системы), и (в) преднамеренного запуска, основанного на неправильной информации (из-за неисправности системы раннего предупреждения, неправильной интерпретации не угрожающего события, неверного восприятия ядерного нападения третьей стороны или террористов, неверного восприятия случайного ядерного взрыва на своей территории, или неправильной интерпретации моделируемой тренировочной атаки как реального нападения)⁵. В исследовании обсуждается 10 вариантов улучшения ситуации по нескольким критериям, и рекомендуется «поэтапный подход к улучшению ядерной безопасности и американо-российских отношений».

На политическом уровне президенты США и России Клинтон и Ельцин на своей конференции на высшем уровне 1998 года уже согласились обмениваться информацией по запускам ракет и раннему предупреждению, включая возможное создание центра по обмену данными о запусках ракет, и выразили намерение изучить многостороннюю систему оповещения перед запусками с другими странами⁶. Однако, несмотря на некоторые подготовительные действия, объединенный центр раннего предупреждения, или объединенный центр обмена данными так и не были созданы.

¹ П. Подвиг, «История и современное состояние российской системы раннего предупреждения.» *Наука и всеобщая безопасность* 10 (1) (2002): 21–60; см. также G. Forden, P. Podvig, T. Postol, «False alarm, nuclear danger - The radar and satellite networks meant to warn Russia of the imminence of a missile attack are breaking down, heightening the risk of accidental nuclear war.» *IEEE Spectrum* 37 (3) (March 2000): 31–39.

² Между январем 1979 и июнем 1980 года, четыре ложные тревоги в США были сочтены достаточно серьезными для того, чтобы созвать так называемую конференцию для оценки угрозы, см. International Foundation for the Survival and Development of Humanity, *Reducing the Dangers of Accidental and Unauthorized Nuclear Launch and Terrorist Attack: Alternatives to a Ballistic Missile Defense System*. International Foundation for the Survival and Development of Humanity, San Francisco, CA (Jan. 1990). В 1995 году норвежская высотная исследовательская ракета была ошибочно принята за запущенную с подлодки ядерную баллистическую ракету «Трайдент», и был информирован Президент Ельцин, Forden/Podvig/Postol (ссылка 1).

³ B. G. Blair, H. A. Feiveson, and F. N. von Hippel, «Taking Nuclear Weapons Off Hair-Trigger Alert.» *Scientific American* 277 (5) (Nov. 1997): 74–81.

⁴ G. Forden, *Reducing a Common Danger - Improving Russia's Early-Warning System*. Policy Analysis no. 399, Cato Institute, Washington DC (May 3, 2001), [<http://www.cato.org/pubs/pas/pa399.pdf>] (March 11, 2004).

⁵ D. E. Mosher, L. H. Schwartz, D. R. Howell, and L. E. Davis, *Beyond the Nuclear Shadow—A Phased Approach for Improving Nuclear Safety and U.S.—Russian Relations*. MR-1666, RAND, Santa Monica, CA (2003).

⁶ «Clinton/Yeltsin on Exchange of Info on Missile Launches.» *USIS Washington File* (Sept. 2, 1998), [<http://www.fas.org/news/russia/1998/98090215 tpo.html>] (Febr. 9, 2004).

Кооперативный мониторинг запусков баллистических ракет

Среди мероприятий, которые обсуждались и рекомендовались в исследовании РЭНД для ближайшего времени, было кооперативное развертывание датчиков на шахтах МБР. Датчики должны были обнаруживать запуск и предоставлять надежно подтверждение того, что ракета была запущена⁷. Эта концепция берет свое начало по крайней мере от 1980-х гг., когда Ричард Гарвин предложил устанавливать на крышках шахт небольшие радиотехнические системы, которые будут передавать сигналы до тех пор, пока крышки будут оставаться закрытыми⁸. Для того, чтобы уменьшить опасность случайного и несанкционированного запуска ядерной ракеты, международное совещание предложило в 1990 году несколько мероприятий, и среди них «расположенных на территории страны систем раннего предупреждения, управляемых другой стороной». В качестве примера приводились датчики (неустановленного типа), размещаемые на шахтах МБР, которые непрерывно передают кодированные радиосигналы до тех пор, пока ракеты не будут запущены, и эти датчики не будут подделываться⁹. Если указания о запуске МБР будут получены со спутника или радара, но не будут получены от датчиков на шахте, то это может быть указанием на ложную тревогу. В предложении от российского Курчатовского института упоминалось несколько типов датчиков, которые могли бы быть использованы для МБР в шахтах: оптические контуры, инфракрасные датчики, детекторы дыма, детекторы перемещения, детекторы радиации, датчики температуры, и видеокамеры. Подобные этим системы, разрабатываемые в российско-американских совместных работах по защите, учету и контролю ядерных материалов, могли бы быть использованы для мониторинга всех стратегических ядерных сил¹⁰. В исследовании РЭНД 2003 года рассматриваются эти идеи и обсуждается применение сейсмических датчиков за пределами шахт МБР, возможно, включающее оптоволоконные печати на крышке шахты. Поскольку МБР шахтного базирования продолжают занимать центральное положение для первого удара – по крайней мере в восприятии обеих сторон – более навязчивое расширение на мобильные МБР, баллистические ракеты с морским стартом (базирующиеся на подлодках), и бомбардировщики, может оказаться ненужным. При нескольких датчиках на шахту система становится надежной по отношению к ложным тревогам и может стоить значительно меньше, чем другие подходы к улучшению российского раннего предупреждения, в особенности космического базирования¹¹.

Помимо этих общих концепций, в открытой литературе не появлялось других подробностей. Датчики, установленные непосредственно на шахтах (например, сигнализирующие об открытии крышки), будут означать вторжение в весьма чувствительную область. Из других типов датчиков, которые могут быть развернуты на некотором расстоянии, оптические датчики (инфракрасные датчики или видеокамеры) могут быть заблокированы туманом и сильным снегопадом. Микрофоны обнаружат сильный шум при запуске, но они будут подвержены погодным условиям, требуя чистки и обслуживания. Дополнительным недостатком микрофонов является то, что они могут быть сравнительно просто подвержены помехам от расположенных рядом громкоговорителей¹². Однако, шум при запуске также приводит в движение

⁷ Mosher et al. (ссылка 5), глава 4 (вариант 2), глава 5.

⁸ См. R. L. Garwin, "Space-Based Defenses Against Ballistic Missiles." *Proc. AAAS Annual Meeting Symposium* (Febr. 8, 1992), [<http://fas.org/rlg/920208-space.pdf>] (Febr. 14, 2004); R. L. Garwin, "Post-START: What do We Want? What Can We Achieve?" Testimony to the Committee on Foreign Affairs, United States Senate, February 27, 1992, [<http://fas.org/rlg/022792.htm>] (Febr. 14, 2004).

⁹ International Foundation (ссылка 2).

¹⁰ E. Velikhov, N. Ponomarev-Stepnoi, V. Sukhoruchkin, *Mutual Remote Monitoring*. Kurchatov Institute, Moscow (1999).

¹¹ Mosher et al. (ссылка 5), глава 4, вариант 2.

¹² Это будет менее применимо к способным регистрировать инфразвук системам труб и микрофонов, разнесенных на десятки метров, которые используются для мониторинга атмосферных ядерных взрывов на расстояниях в тысячи километров по Договору о всеобщем запрещении ядерных испытаний, [см. <http://www.ctbto.org>], Verification Regime, Overview (Feb.

грунт, и это движение может быть зарегистрировано сейсмическими датчиками, которые полностью закрыты, и могут быть закопаны, сводя к минимуму установку наземного оборудования. Из-за большой массы включенного грунта, глушение сейсмических датчиков потребует значительно большей энергии и усилий.

Данная статья посвящена этой концепции. В ней анализируется физика сейсмического обнаружения запусков МБР, и определяются выводы для конструирования системы датчиков. В следующем разделе описывается генерация шума при запуске и траектория источника. В следующем разделе описывается распространение звука до положения на земной поверхности. Предметом следующего после этого раздела является обсуждение того, как проходящий звук возбуждает вибрации грунта, которые могут быть восприняты сейсмическими датчиками. Аспекты регистрации и дискриминации других источников рассматриваются в следующем разделе. После этого следует раздел, в котором обсуждаются системные аспекты, включая стоимость, и другой раздел, в котором представлены выводы и рекомендации.

ШУМ ПРИ ЗАПУСКЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ РАКЕТЫ И ЕЕ ТРАЕКТОРИЯ

Двигатель и мощность шума

Баллистическая ракета ускоряется отдачей горячих выхлопных газов, выбрасываемой из сопла на высокой скорости. Необходимо ввести несколько характеристических параметров¹³. Основная часть силы тяги

$$F = \frac{dm}{dt} v + (p_e - p_a) A_e \quad (1)$$

определяется произведением величины потока массы dm/dt , умноженным на скорость истечения v ; если давление на срезе сопла p_e не равно давлению в окружающей среде p_a , то произведение разности давлений, умноженное на площадь среза сопла, добавляет другую часть, которая увеличивается по мере подъема ракеты к вакууму внешнего пространства. Часто второй член включается в первый посредством введения эффективной скорости истечения

$$v_e = \frac{F}{dm/dt} = I_s g \quad (2)$$

где $g = 9,81$ – ускорение силы тяжести на уровне моря и I_s – так называемый удельный импульс. Механическая мощность истекающих газов равна

24, 2005). Новый тип такой аппаратуры может быть даже помещен под слой крупного гравия толщиной в 20 см, см. M. A. Zumberge et al., "An Optical Fiber Infrasound Sensor: A New Lower Limit on Atmospheric Pressure Noise Between 1 Hz and 10 Hz." *Journal of the Acoustical Society of America* 113 (5) (May 2003): 2474–2479. Используя датчик длиной 89 м, авторы обнаружили запуск ракеты на расстоянии 396 км, с амплитудой звука около 0,5 Па (0,1–10 Гц), вероятно образованный от ударной волны от входа первой ступени в атмосферу (см. Раздел 2, Типичная траектория, ниже). Из-за двадцатиминутного распространения звука, такое расстояние будет неприемлемым для раннего предупреждения атаки, и возможность надежной дискриминации от других событий с малой амплитудой остается под вопросом. Смогут ли закопанные инфразвуковые датчики оставаться полезными для обнаружения запуска на меньших расстояниях (сотни метров от отдельных шахт, или десятки километров для покрытия нескольких шахт одним датчиком (см. Раздел 5, Краткий обзор, ниже)), заслуживает отдельного исследования. Требования по установке могут оказаться аналогичными схеме с использованием сейсмических датчиков, но объем работ по обслуживанию может оказаться выше.

¹³ G. P. Sutton, *Rocket Propulsion Elements* (Wiley, New York, 1986).

$$P_{kin} = \frac{dm}{dt} \frac{v^2}{2} \approx \frac{Fv}{2} \quad (3)$$

(во втором, приближенном выражении, компонентой давления в уравнении (1) пренебрегается). При температурах выше 2000 К и скоростях выше 2 км/с течение является сверхзвуковым, и приводит к образованию волн Маха в окружающем воздухе. Вторым источником шума является турбулентное перемешивание. Механизмы являются сложными¹⁴. Однако, было обнаружено, что акустическая эффективность

$$\eta_{ac} = \frac{P_{ac}}{P_{kin}} \quad (4)$$

или отношение акустической мощности P_{ac} к кинетической мощности, близко к 0,005 с неопределенностью около $\pm 0,002$ ^{14,15}. Ракеты производят исключительно громкий шум, значительно более сильный, чем у военных самолетов с форсажными камерами. В табл. 1 показаны основные характеристики межконтинентальных баллистических ракет США и России; для акустико-сейсмического мониторинга важнейшей является первая ступень. Продолжительность ее работы обычно составляет около 1 минуты.

Для первой ступени американской ракеты Минитмен-III (находящейся на вооружении с 1970 года) имеется очень подробная информация¹⁶. Из действительного удельного импульса $I_s = 214$ с из уравнения (1) следует, что $v_e = 2,1$ км/с. Средняя тяга равна $F = 0,866$ МН, так что из уравнения (2) величина потока массы равна $dm/dt = 412$ кг/с¹⁷. Из уравнения (3), приближенно приравнявая v и v_e , механическая мощность газов равна $P_{kin} = 0,9$ ГВт, и из уравнения (4) с $\eta_{ac} = 0,005$ следует, что акустическая мощность $P_{ac} = 4,5$ МВт.

Для более современной американской твердотопливной ракеты «Миротворец» (поступившей на вооружение в 1986 году) можно предположить более высокий удельный импульс. При тяге первой ступени в 2,2 МН и величине потока массы $dm/dt = 802$ кг/с¹⁸, $v_e = 2,74$ км/с и $I_s = 280$ с¹⁹. при несколько меньшем v , $P_{kin} \approx 3$ ГВт и акустическая мощность $P_{ac} \approx 15$ МВт.

Для сравнения, тяга больших космических ракет-носителей существенно больше – для лунной ракеты Сатурн-V (пять стартовых двигателей с углеводородным горючим и жидким кислородом с $v_e = 2,6$ км/с на уровне моря), она равна 33,7 МН, для «Спейс Шаттл» (три основных двигателя с топливом из жидкого кислорода и жидкого водорода с $v_e = 3,6$ км/с и двух твердотопливных ускорителей с $v_e = 2,4$ км/с) – 29 МН²⁰. Принимая во внимание не-

¹⁴ См., например, J. Varnier, "Experimental Study and Simulation of Rocket Engine Freejet Noise." *AIAA Journal* 39 (10) (Oct. 2001): 1851–1859 and refs.

¹⁵ S. A. McInerney, "Launch Vehicle Acoustics Part 1: Overall Levels and Spectral Characteristics." *Journal of Aircraft* 33 (3) (May-June 1996): 511–517.

¹⁶ Sutton (ссылка 13), pp. 263f.

¹⁷ При использовании массы топлива $m_p = 20\,789$ кг и времени горения 52,6 с, получается несколько иное среднее значение $dm/dt = 395$ кг/с. В данном контексте такие различия не имеют значения.

¹⁸ Peacekeeper (MX) ICBM Technical Specifications, [http://www.geocities.com/peacekeeper/icbm/specs.htm] (Sept. 16, 2004) (масса топлива в первой ступени 45 300 кг, время горения 56,5 с).

¹⁹ В материале Peacekeeper Specifications (ссылка 18) для удельного импульса дается 282 с. С другой стороны, Sutton (ссылка 13), p. 293, дает 265 с как верхний предел диапазона I_{sp} для ракет на твердом топливе. Оба заявления могут совпадать, если значение 282 с относится к вакууму. В этом случае из уравнения (1) на уровне моря и на большой высоте можно определить $I_{sVac} - I_{sSL} = p_0 A_e / (g dm/dt) = 21$ с с $p_0 = 101$ кПа, $A_e = 1,66$ м²; поэтому, $I_{sSL} = 261$ с, и $v_e = 2,56$ км/с. Это может привести к меньшей тяге $F = 2,05$ МН и кинетической мощности около 2,5 ГВт. Поскольку отклонения в акустической мощности на 10 ли 20% не имеют значения, я оставил этот вопрос открытым. В расчетах траектории я использовал 261 с, см. ссылку 1 на Рис. 1; в качестве акустической мощности я использовал 15 МВт, см. Рис. 6.

²⁰ Sutton (ссылка 13), p. 14, 196; удельный импульс твердотопливных ускорителей Шаттла на уровне моря равен 242 с, в вакууме 268,6 с, см. "Countdown! NASA Launch Vehicles and Facili-

сколько большие скорости истечения для двигателей на жидком топливе, можно считать, что их механические, и, следовательно, акустические мощности на порядок величины больше, чем у МБР.

Типичная траектория

Поскольку масса ракеты уменьшается по мере того, как сгоревшее топливо покидает сопло, ускорение возрастает в течение времени работы каждой ступени. Для датчиков на земле первая (и самая большая) ступень является самой важной. Для того, чтобы уменьшить торможение в нижних слоях атмосферы, баллистические ракеты на протяжении первых нескольких километров обычно поднимаются вертикально вверх. Обычно при выгорании первой ступени на высоте в 25 км достигается скорость 1,5 км/с; в зависимости от выбранной траектории, горизонтальная дальность может составлять 15 – 30 км. На рис. 1 показана расчетная траектория во время работы первой ступени для модели ракеты без активного управления траекторией – поворот к оптимальному углу для максимальной дальности осуществляется за счет действия тяжести, начиная с фиктивного отклонения от вертикали. На рис. 2 показаны ускорение, скорость, высота, проекция наземного расстояния до выгорания четвертой ступени.

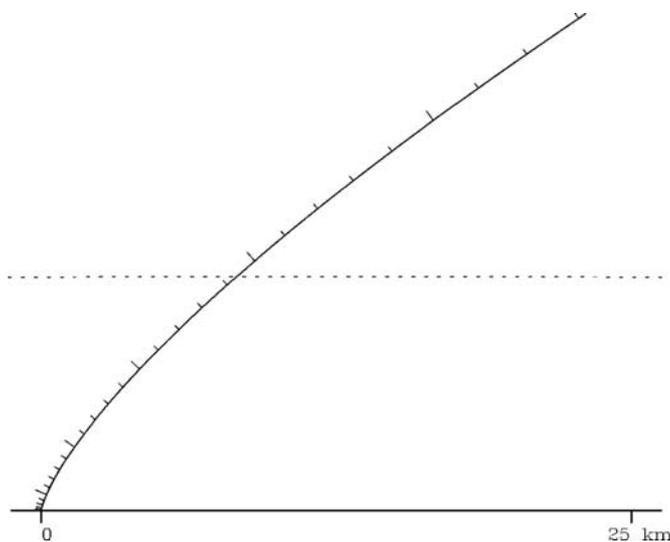


Рис. 1. Траектория запуска до выгорания первой ступени для модели ракеты, аналогичной американской ракете Peasekeeper, с использованием гравитационного поворота для достижения максимальной дальности 10 800 км. Выгорание четвертой ступени происходит через 384 с на высоте 509 км с горизонтальной дальностью 1 528 км, под углом 13,9° на скорости 6,65 км/с²¹. Один штрих соответствует 2 с. В течение работы первой ступени ускорение уве-

ties.” PMS 018-B (October 1991), Section 2, NASA Facts Online, Kennedy Spaceflight Center, [<http://www-pao.ksc.nasa.gov/kscpao/nasafact/count2.htm>] (Febr. 4, 2005).

²¹ Рассчитано при помощи программы KMRak, описанной в Altmann, *SDI for Europe? Technical Aspects of Anti-Tactical Ballistic Missile Defenses*, PRIF Research Report 3/1988, Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung, Frankfurt/M. (1988). Программа включает зависящие от высоты силу тяжести, плотность воздуха, скорость звука, и зависящий от числа Маха коэффициент торможения. Пренебрегается меньшими эффектами, такими, как вращение Земли, или подъемная сила во время разгона. Траектория на участке разгона активно не контролируется. Исходные данные в основном взяты из технических характеристик ракеты Peasekeeper (ссылка 18), с учетом округления значений масс до 1000 или 100 фунтов. Я не отслеживал технические характеристики по официальным источникам, поскольку (1) они кажутся разумными, и (2) точные подробности здесь не важны – поэтому ракета и обозначается как «модель баллистической ракеты». Площадь среза сопла взята из McNerny (ссылка 15), другие площади и все давления на срезе сопла оценены по приблизительным размерам сопел на эскизе ракеты в технических характеристиках ракеты Peasekeeper (ссылка 18). Используемые исходные данные: массы пустых ступеней: 3 700, 2 700, 630, 545 кг; массы топ-

личивается от 13,5 до 44 м/с², в конце скорость составляет 1,4 км/с, высота – 21 км, и горизонтальная дальность – 23 км. Скорость звука в 0,33 км/с достигается через 20 с на высоте 2,8 км. Поскольку для действительных ракет траектория активно управляется с вертикальным подъемом в начале, вероятны отклонения высоты выгорания и горизонтальной дальности. В настоящей модели отделенная первая ступень достигает максимальной высоты в 50 км и ударяется о землю в 207 км от точки запуска.

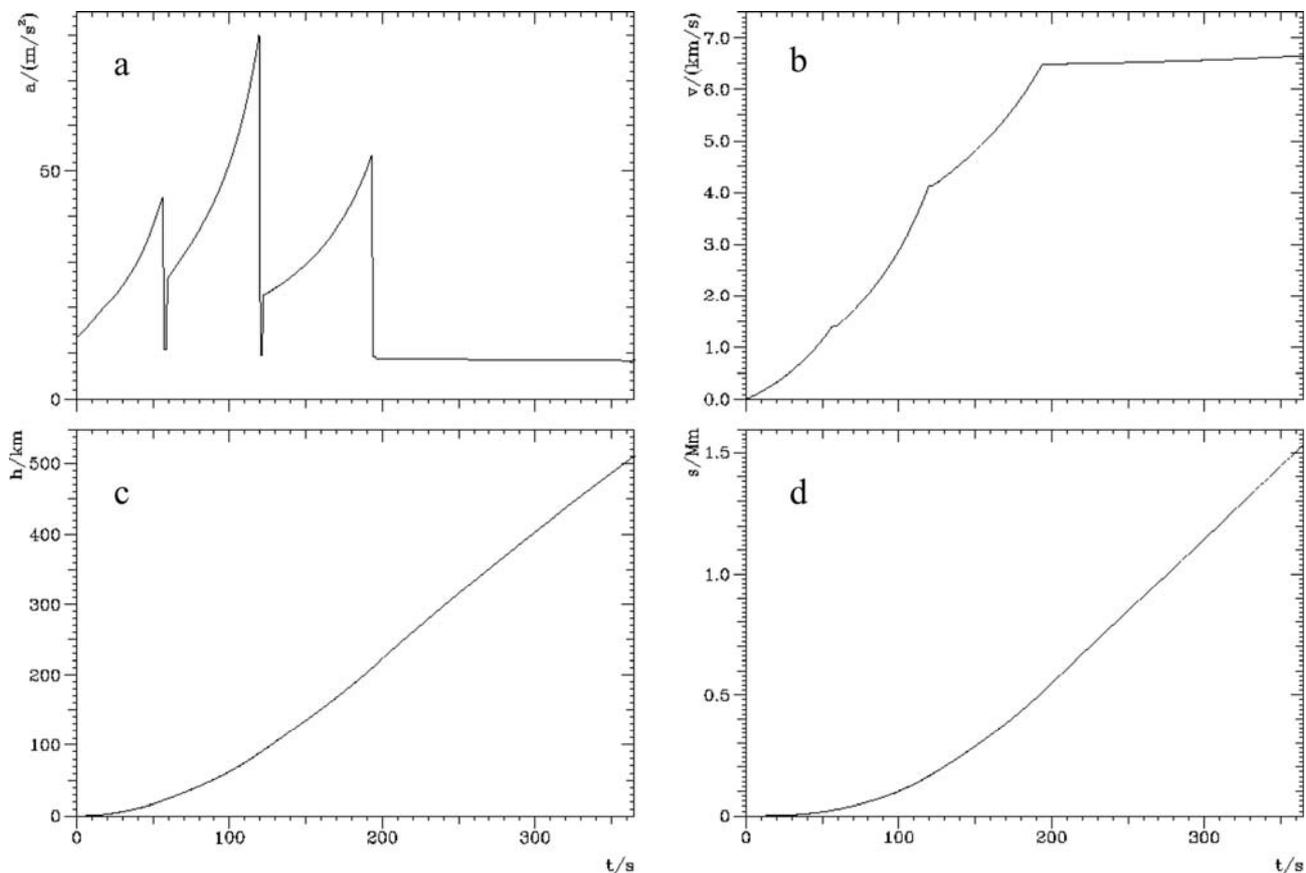


Рис. 2. Кинематические характеристики модели баллистической ракеты с Рис. 1 от запуска до выгорания последней (здесь четвертой) ступени: (а) ускорение, (б) скорость, (с) высота, (д) горизонтальная дальность от точки проекции на землю до точки запуска. По горизонтальной оси отложено время в секундах.

лива 45 300, 24 500, 7 080 кг; времена выгорания 56,5, 60,7, 72,0, 168,0 кг; скорости истечения 2,52, 3,02, 2,93, 2,92 км/с; давления на срезе сопла 122, 15, 24, 22 кПа; площади среза сопла 1,66, 3,46, 0,68, 0,17 м²; поперечные сечения всех ступеней 4,3 м²; все задержки ступеней 2 с; все коэффициенты торможения для малой скорости 0,25; масса полезной нагрузки 3 600 кг; головная часть: масса 200кг; поперечное сечение 0,24 м; коэффициент торможения для малой скорости 0,15. Масса полезной нагрузки (заданная как 2 100 кг) сначала была увеличена до 2 900 кг для того, чтобы сумма всех масс равнялась общей массе (данной как 88 400 кг – Cochran et al. (сноска а из табл. 1) дает 87 500 кг, затем она была еще раз увеличена до 3 600 кг, чтобы максимально достижимая дальность была равна 10 800 км.

Табл. 1. Характеристики американских и российских межконтинентальных баллистических ракет, базирующихся в шахтах (иногда в литературе приводятся несколько значений).

| Тип (западное название) | Minuteman III ^а | Peacekeeper ^б | УР-100Н УТТХ (SS-19 Mod. 3) ^в | Тополь-М (SS-27) ^г |
|---------------------------------|----------------------------|---|---|----------------------------------|
| Стартовая масса (кг) | 35 300; 34 500 | 87 500 | 105 600 | 47 200 |
| Длина (м) | 18,3 | 21,6 | 24,3 (с контейнером) | 22,7 |
| Количество ступеней | 3 | 4 | 2 + блок разведения | 3 |
| Дальность (км) | 14 800; 12 900 | 10 700; >13 000 | 10 000 | >10 000 |
| Полезная нагрузка (кг) | 1 090; 680 – 910 | 3 580; 3 270 | 4 350 | 1 000 |
| Количество боеголовок | 2 или 3 | 10 | 6 | 1 |
| Мощность на боеголовку (кТ ТНТ) | 170 или 335 – 350 | около 300 | 550 – 750 | 550 |
| Топливо | Твердое | Твердое | Хранящееся жидкое | Твердое |
| Диаметр первой ступени (м) | 1,67 | 2,33 | 2,5 | 1,86 |
| Количество сопел | 4 | 1 ^е | 4 | - |
| Тяга первой ступени (МН) | 0,87 | 2,2 | 1,84 | - |
| Примечания | - | Холодный запуск ^д Первоначально мобильная (железнодорожная) | | Также мобильная (автодорожная) |

^а Т. В. Cochran, W. M. Arkin, M. M. Hoenig, *Nuclear Weapons Databook, Volume I.U.S. Nuclear Forces and Capabilities*. (Ballinger, Cambridge MA, 1984); Sutton (ссылка 13) pp. 263 f., 335.
^б Cochran et al. (сноска а); Peacekeeper [<http://www.astronautix.com/lvs/peaceper.htm>], (March 29, 2004).
^в Р. Podvig (ed.), *Russian Strategic Nuclear Forces*. (MIT Press, Cambridge MA/London, 2001).
^г Р. Podvig (сноска в).
^д McInerney 1996 (ссылка 15).
^е Ракета выбрасывается из контейнера давлением газогенератора, зажигание двигателя происходит потом.

Поскольку акустическая амплитуда уменьшается с ростом расстояния от источника, наземные датчики, расположенные рядом с расположением запуска, будут регистрировать максимальный сигнал в начале траектории. Датчики, расположенные дальше, будут находиться на более коротком расстоянии от источника в более позднее время, если траектория отклоняется от вертикали и приближается к ним по азимуту, то, тем не менее, расстояние будет составлять десятки километров с соответствующими низкими амплитудами (см. рис. 1).

Примерно через 20 с после запуска ракета достигнет сверхзвуковой скорости, создав конус волны Маха. Во время подъема он будет направлен вверх и не достигнет земли. Однако, при достаточно наклонной траектории конус может коснуться земли, создав сильный звуковой удар²². Поскольку этот эффект и его расположение сильно зависят от траектории,

²² Из-за ускорения ударные волны, произведенные в различные времена, могут даже накладываться на меньшей площади, приводя в ней к «фокусированию ударной волны». См., например, *Final Supplemental Environmental Impact Statement for the Evolved Expendable Launch*

он не рекомендуется в качестве надежного указания на запуск, или его отсутствие.

Другой конус Маха возникает, когда первая ступень входит в нижние слои атмосферы – и здесь ударные волны всегда направлены к земле. Звуковые удары от входа первой ступени, однако, могут наблюдаться непосредственно, или после взаимодействия с грунтом с возбуждением сейсмических волн – даже на расстоянии в тысячи километров. На таких больших расстояниях остается только один инфразвук, и необходимы многократные отражения, которые зависят от условий ветров в стратосфере, и амплитуды являются очень слабыми²³. Даже хотя звуковые удары и будут надежно обнаруживаться в области входа, они не являются оптимальными для обнаружения запусков по нескольким причинам. Расположение входа сильно зависит от выбранной траектории и может находиться дальше, чем 250 км от точки запуска, так что должна быть покрыта большая площадь. Во-вторых, они приходят с задержкой до более четырех минут после запуска. И, наконец, звуковой удар производится также сверхзвуковыми самолетами, и различение таких событий требует сложного анализа сигналов от многих датчиков²⁴.

Характеризация источника

Акустическое излучение от работающего ракетного двигателя возникает в результате двух основных эффектов²⁵. В начале формирования сверхзвукового струйного течения возникает турбулентное перемешивание с внешним воздухом. Вихри образуются, растут, сливаются, и пропадают. С увеличением захвата воздуха ядро ламинарного потока становится все более тонким. На больших расстояниях от сопла образуются большие нерегулярные трехмерные структуры. Шум турбулентного перемешивания является широкополосным и сильно направленным, с максимумом около 30° от оси истечения. Второй источник обусловлен наклонными ударными волнами и веерными потоками, которые первоначально образуются на краях сопла и затем несколько раз отражаются от струи на ее границе, образуя так называемые ударные ячейки с квазипериодическим рисунком. Когда крупномасштабные турбулентные структуры проходят через ячейки, взаимодействие с ударными волнами приводит к акустическому излучению. Поскольку вносят вклад различные волноводные моды, комбинированное излучение обладает относительно слабым спектральным максимумом. Этот так называемый широкополосный ударный шум в основном излучает в направлениях, близких к 90°. При некоторых условиях, акустические волны, распространяющиеся назад вне

Vehicle Program. U.S. Air Force (March 2000), App. U, Section 4, [<http://fas.org/spp/military/program/launch/eelv-eis2000>] (July 15, 2003).

²³ См., например, W. L. Donn, E. Posmentier, U. Fehr, N. K. Balachandran, "Infrasound at Long Range from Saturn V, 1967." *Science* 162 (3858) (Dec. 6, 1968): 1116–1120; K. L. McLaughlin, A. Gault, D. J. Brown, "Infrasound Detection of Rocket Launches." *22nd Annual DoD/DoE Seismic Research Symposium*, New Orleans LA, 2000, [available via <http://www.rdss.info>] (seismic research) (Febr. 3, 2005), и ссылки в ней. Аналогично, сверхзвуковой самолет, такой, как Конкорд, обнаруживался на больших расстояниях на инфразвуковых частотах с малой амплитудой, сильно зависящей от условий в стратосфере. См., например, A. Le Pichon, M. Garces, E. Blanc, M. Barthelemy, D. P. Drob, "Acoustic Propagation and Atmosphere Characteristics Derived from Infrasonic Waves Generated by the Concorde." *Journal of the Acoustical Society of America* 111 (1, Pt. 2) (Jan. 2002): 629–641. О сейсмических измерениях см., например, в W. L. Donn, I. Dalins, V. McCarty, M. Ewing, G. Kaschak, "Air-Coupled Seismic Waves at Long Range from Apollo Launchings." *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 26 (1–4) (Dec. 1971): 161–171.

²⁴ Система глобального мониторинга Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний не приспособлена для этой работы; например, в Северной Америке имеется только три инфразвуковых станции (в Манитобе, Аляске, Калифорнии) [<http://www.ctbto.org/>], Verification Regime, Monitoring Facilities (July 14, 2005). Даже если они случайно обнаружат запуск ракеты, это будет ненадежно и, с учетом времени распространения около часа, слишком поздно для раннего предупреждения.

²⁵ С. К. W. Tam, "Jet Noise Generated by Large-Scale Coherent Motion." H. H. Hubbard (ed.), *Aeroacoustics of Flight Vehicles - Theory and Practice, vol. 1, Noise Source*. (Acoustical Society of America, Woodbury NY, 1995),

струи и воздействующие на края сопла, могут сформировать контур обратной связи, усиливая одну изолированную частоту. Нелинейное укрупнение фронтов волн из-за большей скорости звука при большом давлении также будет создавать гармоники. Когда появляются эти так называемые визжащие тона, они будут в основном излучаться в переднем направлении.

Генерация шума от реактивных двигателей – это поле активных теоретических и экспериментальных исследований. В эмпирических исследованиях и моделях используются законы подобия для учета различных типов ракет²⁶. Длина акустически активного факела примерно равна $5 L_C$, а максимальная акустическая мощность излучается приблизительно при L_C , где L_C – длина ламинарной сердцевины, приближенно равная $(16 - 20) D_e$ (рис. 3)²⁷. Поток остается сверхзвуковым до большей длины, а именно $L_{SC} = (25 - 35) D_e$ ²⁸. Направленность в дальней зоне может быть описана с использованием числа Струхала:

$$Sr = fD_e/v \quad (5)$$

или безразмерной частоты (f – частота). Когда это число меняется между 0,004 и 0,4, направление максимума меняется от около 30° до около 60° от оси струи – низкие частоты предпочтительно излучаются более близко к оси струи. Спектры в дальней зоне в направлении общего максимума, измеренные после распространения на большие расстояния, показаны на рис. 5.

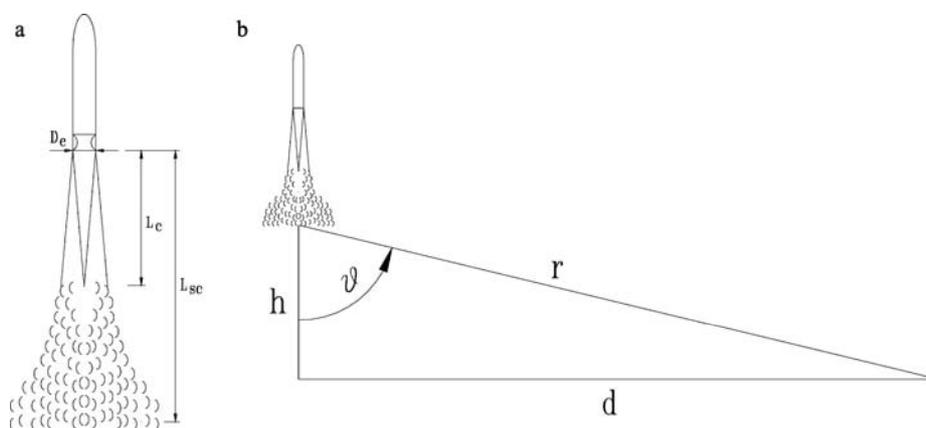


Рис. 3. Турбулентное перемешивание с окружающим воздухом газовой струи, покидающей сопло с диаметром D_e , с окружающим воздухом сокращает область ламинарного течения; за пределами длины L_C ламинарной сердцевины все течение является турбулентным, оставаясь сверхзвуковым на большей длине L_{SC} (a). Сила излучения звуковых волн изменяется с расстоянием от сопла, частотой и углом ϑ от оси струи (b). Максимальное излучение возникает примерно на 2 , направление самого сильного излучения меняется с частотой между $\vartheta = 30^\circ$ для низких частот и $\vartheta = 60^\circ$ для высоких частот. Звук, достигающий детектора на расстоянии d от точки запуска, в основном зависит от угла ϑ и расстояния r до источника (не в масштабе).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ШУМА

Акустическое излучение распространяется от различных источников в факеле во всех направлениях. Пока повышенные и пониженные давления остаются большими (скажем,

²⁶ См., например, McInerney (ссылка 15); J. Varnier, "Experimental Study and Simulation of Rocket Engine Freejet Noise." *AIAA Journal* 39 (10) (Oct. 2001): 1851–1859, и соответствующие ссылки в них.

²⁷ McInerney (ссылка 15) оценивает максимум при $(L_C + L_S)/2$, что примерно равно $1,3 L_C$.

²⁸ Одна формула для длины сверхзвуковой центральной области такова $L_{SC} = D_e(5,22 M_c^{0,9} + 0,22)$, где $M_c = v/v_s$ – число Маха для вытекающего потока, и v_s – скорость звука в горячей струе; не следует путать ламинарную и сверхзвуковую центральные области, Varnier (ссылка 26). Отметим, что, например, при $T = 2000$ К, v_s в $(2000\text{K}/293\text{K})^{1/2}$ раз больше скорости звука при 293 К, т.е. 890 м/с вместо 340 м/с.

превышающими примерно 0,001 от атмосферного давления, или 100 Па), возникают нелинейные эффекты: максимумы давления движутся быстрее, перекрывая и поглощая максимумы и минимумы меньшей амплитуды, и образуя резкие скачки давления, или так называемые слабые ударные волны, которые также более сильно поглощаются²⁹. Кроме того, действуют различные механизмы линейного поглощения звука в атмосфере, и происходит наложение вкладов различных источников. В дальней зоне система может рассматриваться как флуктуирующий точечный источник.

Сначала будут приведены некоторые основные сведения: акустическая интенсивность I (поверхностная плотность энергии) и звуковое давление p (то есть, отличие от статического давления) связаны следующей формулой:

$$I = P_{ac} / A = p^2 / \rho_0 c_s \quad (6)$$

где произведение статической плотности ρ_0 и скорости звука малой амплитуды c_s называется импедансом свободного воздуха, примерно равным 400 кг/(м²с). Уравнение (6) справедливо для мгновенных значений, так же, как и для среднеквадратичных значений, которые используются более часто. Обычная логарифмическая мера интенсивности звука, уровень звука L , дает те же самые значения для амплитуды и для интенсивности, если используются соответствующие значения для отсчета: обычно принимается $I_{ref} = 10^{-12}$ Вт/м² и $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па. Следовательно, из уравнения (6) имеем:

$$L = 20 \lg(p_{rms} / p_{ref}) = 10 \lg(I_{rms} / I_{ref}) \quad (7)$$

Наиболее важные эффекты распространения таковы:³⁰

Из-за *сферического распределения* давление звука p уменьшается обратно пропорционально расстоянию r :

$$p(r) = p(r_0) r_0 / r \quad (8)$$

где расстояние отсчета r_0 часто принимается равным 1 м (что в настоящем случае является нереальным). При наличии ветра со скоростью v_w , эффективный радиус распространения изменяется на фактор $(1 \pm v_w / c_s)$ для распространения против ветра и по ветру, соответственно (c_s - скорость звука, примерно равная 330 м/с). Из-за того, что скорость ветра на поверхности Земли редко превышает 30 м/с, в большинстве случаев соответствующее изменение амплитуды не превышает 10% (наиболее серьезные изменения происходят из-за ветрового сдвига на больших расстояниях, см. ниже).

Молекулярное поглощение в воздухе добавляет экспоненциальный член:

$$p(r) = p(r_0) (r_0 / r) e^{-\alpha(f)r} \quad (9)$$

Здесь коэффициент поглощения $\alpha(f)$ быстро возрастает с частотой f и зависит от температуры, давления, и влажности. При низких частотах на относительно малых расстояниях, рассматриваемых здесь, поглощение не очень существенно³¹.

Отражение от земли является сложным явлением, в особенности в случае скользящего падения вдоль пористого грунта; сложный акустический импеданс и изменения фазы при-

²⁹ См., например, O. V. Rudenko, S. I. Soluyan, *Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics*. (Consultants Bureau: New York/London, 1977).

³⁰ См., например, T. F.W. Embleton, G. A. Daigle, "Atmospheric Propagation." In H. H. Hubbard (ed.), *Aeroacoustics of Flight Vehicles—Theory and Practice, vol. 2, Noise Control*. (Acoustical Society of America: Woodbury NY, 1995).

³¹ Например, при 40 % относительной влажности, 20 °С и 98 кПа $\alpha(100 \text{ Hz}) = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, т.е. ослабление в $1/e = 0,37$ происходит на 20 км. При 10 Гц, α в 100 раз меньше. См. Рис. 1 в Embleton/Daigle (Ссылка 30).

мерно на 180° приводят к необычному ослаблению на низких частотах³². Однако, в настоящем случае источник поднимается быстро, так что вскоре появятся большие углы падения, на которых земля будет действовать как жесткий отражатель с малым изменением фазы, так что отраженная волна будет складываться конструктивно. Для микрофона на конечной высоте отраженная волна (ослабленная из-за большей длины пути и коэффициента отражения меньше 1) приведет к положительной или отрицательной интерференции на определенных частотах. На уровне земли – который имеет значение для акустико-сейсмической передачи, см. ниже – амплитуда фактически удваивается.

Рефракция звуковых волн происходит, если имеются вертикальные градиенты температуры или скорости ветра. Поэтому скорость звука будет изменяться с высотой, что приведет к искривлению пути лучей. Обычно днем температура уменьшается с высотой, и, поскольку скорость звука пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры, звуковые лучи изгибаются вверх. В случае ветрового сдвига, где скорость практически всегда увеличивается с высотой из-за трения о землю, аналогичные условия возникают для распространения против ветра. Противоположный случай – когда лучи изгибаются вниз – возникает при температурной инверсии, или, в случае ветрового градиента, в направлении по ветру. Изгиб вниз не представляет проблемы для обнаружения шума от запуска ракет³³. Однако, в случае изгиба вверх нижний луч от земли, который только скользит по земле, поднимется вверх от нее (рис. 4), создавая зону тени, в которую звук сможет войти, только благодаря другим, более слабым механизмам (дифракции, рассеяния на турбулентности). Получающаяся малая амплитуда в области тени не представляет проблемы для обнаружения запуска, однако, поскольку источник звука поднимается, зона тени будет перемещаться на все большие и большие расстояния. Для грубой оценки можно предположить линейное изменение скорости ветра с высотой, и тогда лучи будут представлять собой окружности радиуса

$$R = c(\partial c/\partial h) \quad (10)$$

где c - скорость звука и постоянная производная по отношению к высоте h аппроксимируется градиентами температуры T и скорости ветра \vec{v} согласно:

$$\partial c/\partial h \cong 1/2 c/T \partial T/\partial h + \vec{n} \cdot \partial \vec{v}/\partial h \quad (11)$$

\vec{n} – единичный вектор в направлении распространения³⁴. При температурном градиенте в 10 K на 1 км и в предположении увеличении скорости ветра от 0 до земли до 200 км/час = 56 м/с на высоте $h = 10$ км в направлении против ветра градиент скорости звука будет равен $\partial c/\partial h \cong -0,012 \text{ с}^{-1}$, и радиус будет равен 28 км. Из рис. 4 можно определить, что для указанной высоты h на круге расстояние будет равно:

$$d = (2hR - h^2)^{1/2} \quad (12)$$

Потребовав, чтобы звук достигал приемника на земле по крайней мере в течение времени, когда вертикально поднимающаяся ракета достигает высоты h , можно получить максималь-

³² Например. T. F. W. Embleton, J. E. Piercy, N. Olson, "Outdoor sound propagation over ground of finite impedance." *Journal of the Acoustical Society of America* 59 (2) (Feb. 1976): 267–277; K. Attenborough, "Review of Ground Effects on Outdoor Sound Propagation from Continuous Broadband Sources." *Applied Acoustics* 24 (4) (1988): 289–319.

³³ Загибание вниз в верхней атмосфере с отражением от земли, в принципе повторяющимся, является механизмом обнаружения ударных волн на очень больших расстояниях, см. ссылку 22.

³⁴ T. Hidaka, K. Kageyama, S. Masuda, "Sound Propagation in the Rest Atmosphere with Linear Sound Velocity Profile." *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 6 (2) (April 1985): 117–125; G. A. Daigle, T. F. W. Embleton, J. E. Piercy, "Propagation of Sound in the Presence of Gradients and Turbulence Near the Ground." *Journal of the Acoustical Society of America* 79 (3) (March 1986): 613–627.

ное расстояние приемника от точки запуска d . Для круга радиуса $R \approx 28$ км максимальное расстояние приемника для высоты 10 м будет равно 0,75 км, для 100 м – 2,4 км, и для 1 км – 7,4 км. Последнее расстояние не подходит из-за слишком малой амплитуды (см. ниже), так что размещение на расстоянии, не превышающем нескольких километров, оставляет некоторую свободу для более сильных градиентов, когда детектор все еще не будет находиться в зоне тени в течение основной части траектории запуска.

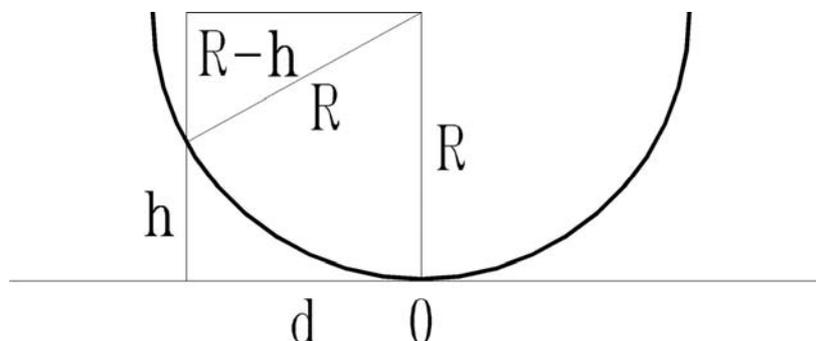


Рис. 4. Граничный луч (круговой для линейного уменьшения скорости звука с высотой) в случае рефракции вверх, нарисованный для приемника на земле в нулевой точке. Детектора может достичь только звук от источника на левой стороне от кривой. Справа под граничным лучом образуется зона тени. Для источников под кривой точка скользящего падения и зона тени сдвигаются влево, так что приемник будет находиться в тени. Горизонтальное расстояние d для заданной высоты h определяется из прямоугольного треугольника.

Последним эффектом, который следует упомянуть, является турбулентность. Случайные флуктуации рассеивают звуковую энергию. Это приводит к зависящим от времени многочисленным путям и увеличивает флуктуации сигнала, которые, однако, в настоящем случае будут возникать изначально (дифракция и дополнительные эффекты от формы поверхности или растений в настоящем контексте не так важны).

Поскольку для настоящих целей требуются только грубые оценки, можно моделировать распространение простым уменьшением с расстоянием как $1/r$, и пренебрегая другими эффектами, имея в виду, что они могут привести к отклонениям порядка двойки. Это оправдано для расстояний, на которых доминирует линейное распространение, и когда высота расположена выше граничного луча для рефракции вниз. Спектры, полученные при запусках американской МБР Peacekeeper, показывают, что зависящие от частоты эффекты невелики, по крайней мере, между 0,2 и 1,2 км (рис. 5)³⁵. На трех расстояниях измерения уровня общего звукового давления лежат в пределах 1 дБ от значений, предсказанных по линейному распространению, в предположении максимального увеличения от направленности в 8 дБ при 70° (у меньших ракет наблюдаются несколько большие отклонения). Поскольку у других источников упоминаются максимальные углы в 60° , или даже меньше, расстояние максимума будет обладать некоторой неопределенностью.

Для того, чтобы получить ощущение величины сигнала и его временного хода, была использована простая модель, в которой максимум не зависящего от частоты увеличения из-за направленности был равен 6 дБ (фактор 4 по интенсивности) при $\vartheta = 60^\circ$, уменьшающийся до 0 дБ при 40° и 80° (вставка на рис. 6):

$$I(t_s) = P_{ac} Df(\vartheta) / (4\pi r^2) \quad (13)$$

где время детектора t_s отстает от времени источника на задержку распространения вдоль наклонного расстояния r .

$$t_s = t + r(t) / c_s \quad (14)$$

и

³⁵ McInerney (ссылка 15).

$$r(t) = h(t) \sin \vartheta(t) \quad (15)$$

с высотой ракеты $h(t)$ и углом к детектору $\vartheta(t)$ в момент t . В предположении вертикального запуска модели баллистической ракеты с $P_{ac} = 15$ МВт, при различных расстояниях от детектора до точки запуска был рассчитан временной ход p_{rms} , следующий из уравнения (13) и уравнения (6), и результат показан на рис. 6. В реальных измерениях сигнал начинается от малых значений из-за влияния земли при скользящем падении и возможной рефракции, позднее отражение увеличит давление до фактора 2. на коротких расстояниях амплитуды будут выше из-за нелинейных эффектов. Поскольку будут включены пренебрегаемые эффекты, следует ожидать отклонений в давлении с фактором от 3 до 6.

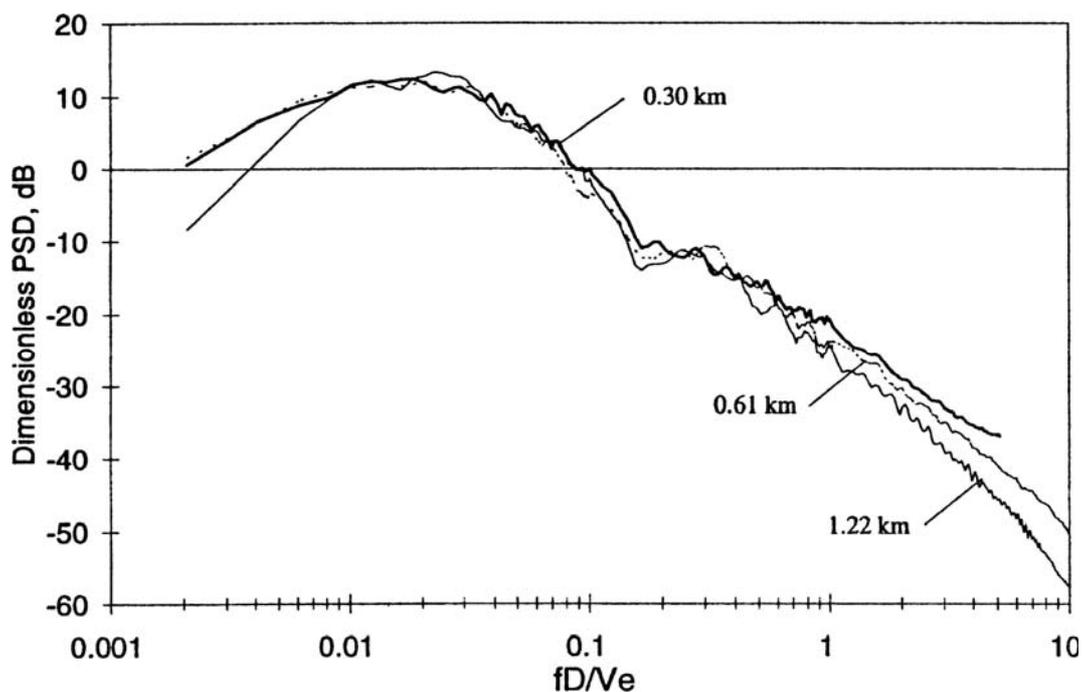


Рис. 5. Безразмерные оценки спектральной плотности мощности звука, усредненные по временному интервалу, когда измеренный общий уровень звукового давления находился в пределах 6 дБ (фактор 4 по интенсивности и фактор 2 по давлению) от максимума, на расстоянии 0,30; 0,61; и 1,22 км от площадки запуска американской МБР Реасекеерг в зависимости от числа Струхаля $St = fD_e/v$ (см. уравнение (5)). При $D_e = 1,45$ м и $v \approx 2,6$ км/с (величина D_e определена из табл. 1 из работы McInerney (ссылка 15), где три абсолютных расстояния также приводятся по отношению к D_e), $Sr = 1$ здесь соответствует $f \approx 1,8$ кГц, максимум находится при 30 – 40 Гц. Средние уровни в течение этого периода были равны 134,9, 128,2, и 123,3 дБ, соответствующие среднеквадратичные давления равны 111, 51, и 29 Па. То, что значения уменьшаются с расстоянием на больших частотах, вероятно, вызвано поглощением в атмосфере. Из работы McInerney (ссылка 15), авторские права American Institute of Aeronautics and Astronautics 1996, перепечатано с разрешения AIAA.

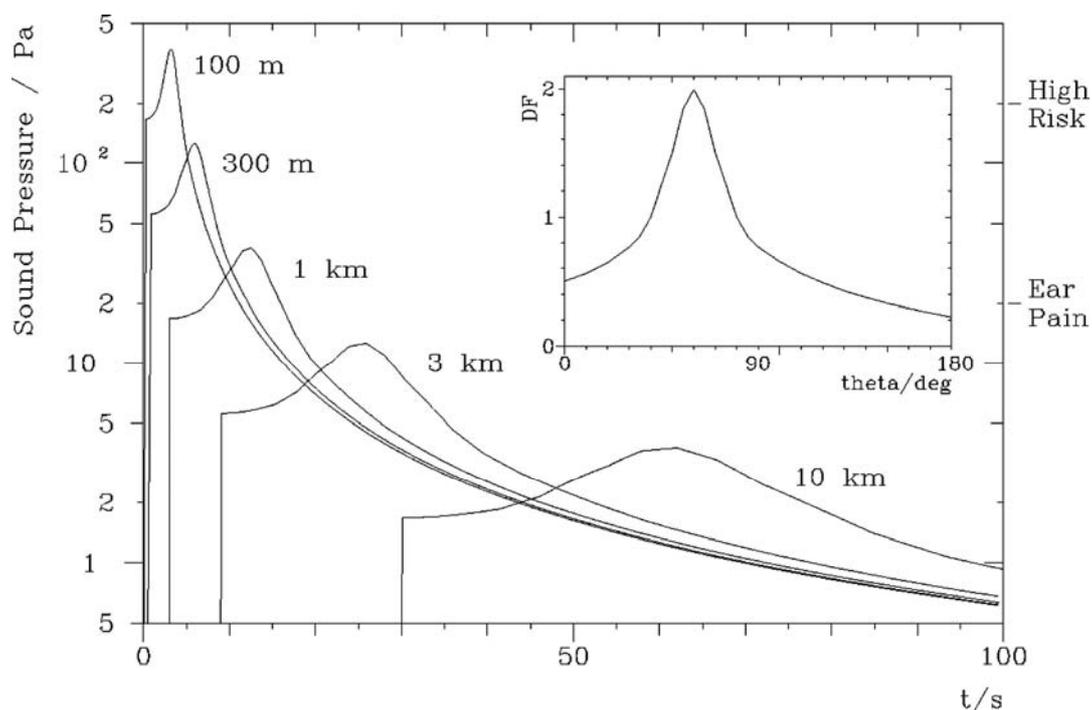


Рис. 6. Теоретический временной ход среднеквадратичного звукового давления (по вертикали, в Па) на различных расстояниях (по горизонтали, в м) от пункта запуска для модели баллистической ракеты с акустической мощностью 15 МВт с применением простой модели (см. текст). Длительность над половиной максимума изменяется от 3,2 с (при 100 м) до 36 с (при 10 км). На деле сила стартового сигнала будет ниже из-за влияния земли при скользящем падении (см. рис. 7). Как правило, боль в ушах начинается при 20 Па (120 дБ по отношению к 20 мкПа), выше 200 Па (140 дБ) даже короткая экспозиция может вызвать постоянную потерю слуха.

Реальный сигнал от американской ракеты Delta, измеренный на расстоянии 0,46 км от пункта запуска, показан на рис. 7. При эффективном диаметре сопла 1,15 м, тяге 3,1 МН, и акустической мощности 20 МВт, эта ракета на твердом и жидком топливе примерно эквивалентна МБР Реасекеерг (15 МВт)³⁶. Увеличение амплитуды плавное, пик амплитуды кажется более асимметричным, но общий вид похож на результат модели. При использовании модели траектории с данными ракеты Delta³⁷ (ускорение примерно вдвое меньше, чем у МБР Реасекеерг) и модели шума с максимальным фактором 4 при 60°, как указано выше, максимальное среднеквадратичное давление на расстоянии 460 м равно 94 Па (возникает через 11,1 с после запуска), с продолжительностью над половиной высоты 12,5 с. Измеренное среднеквадратичное давление через 1 с после максимума равно 64 Па, длительность над половиной максимума равна 8 с; при использовании фактора 6,3 при 70° предсказано 130 Па с применением того же самого подхода³⁸. Следовательно, в грубом приближении модель правильна. Указанием на нелинейные эффекты (слабые ударные волны) в измеренном сигнале является то, что положительные экстремальные значения больше отрицательных. Крутые ударные волны приводят к коэффициенту амплитуды 13 дБ в течение периода, когда среднеквадратичное давление находится в пределах 6 дБ от максимума, так что максимум давления в 4,5 раза больше среднеквадратичного давления. Нелинейные эффекты стано-

³⁶ McInerney (ссылка 15). Отметим, что реальное время запуска неизвестно, S. A. McInerney (частное сообщение).

³⁷ Частично оценено на базе информации по Delta 7920/7925 в "Delta 7000." *Encyclopedia Astronautica*, [<http://www.astronautix.com/lvs/dela7000.htm>] (Nov. 16, 2004).

³⁸ McInerney (ссылка 15), Табл. 1 (предсказанное значение, экстраполированное от 1 км), длительность над половиной ширины оценена из estimated from S. A. McInerney, "Launch Vehicle Acoustics Part 2: Statistics of the Time Domain Data." *Journal of Aircraft* 33 (3) (May-June 1996): 518–523, рис. 1 (воспроизведена здесь как Рис. 7).

вятся отчетливее, когда разделяются индивидуальные пики и долины, в производных, или с помощью специальных коэффициентов (кроме, коэффициента амплитуды, асимметрии, или эксцесса)³⁹.

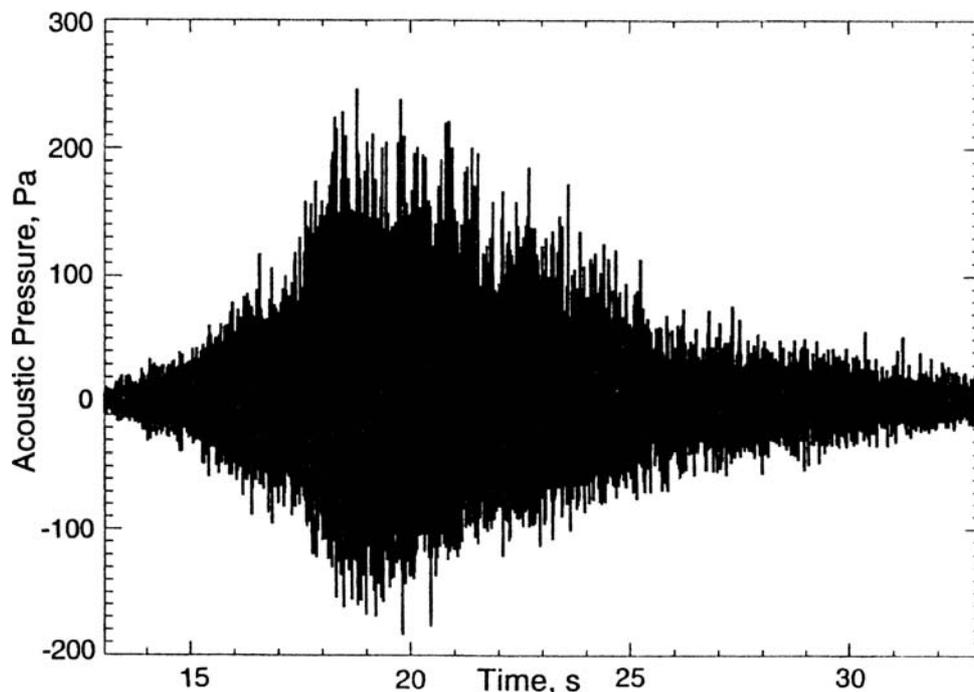


Рис. 7. Давление шума (по вертикали, в Па), измеренное на расстоянии 0,46 км от пункта запуска американской ракеты Delta (время в секундах по горизонтали, начало отсчета произвольное). Сигнал показывает типичную ожидаемую форму, с максимумом амплитуды, возникающим из-за пика направленности, направленного к детектору (см. текст). Отметим, что МБР может ускоряться быстрее, чем космическая ракета-носитель, что приведет к меньшей длительности сигнала. Из работы McInerny (ссылка 38), авторские права American Institute of Aeronautics and Astronautics 1996, перепечатано с разрешения AIAA.

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ШУМОМ ЗАПУСКА

Когда изменения воздушного давления встречаются с грунтом, сила, действующая на последний, изменяется. Поскольку грунт не является жестким, он деформируется. Этот процесс является очень сложным, в особенности, если включаются неплоские волны и слоистая структура, как это обычно случается. Уже для плоских волн в жидком полупространстве, расположенным над твердым полупространством, в зависимости от угла падения, скорости распространения в жидкости, и скоростей продольных и поперечных упругих волн, могут возникнуть сложные углы рефракции и импедансы, соответствующие неоднородному распространению волн вдоль границы⁴⁰. Этот случай используется в сейсмологии для того, чтобы трактовать образованные инфразвуком поверхностные волны релеевского типа (с эллиптическим движением в вертикальном направлении, и в направлении распространения) в земной коре, в которой скорость звука намного меньше сейсмических скоростей⁴¹. Однако, в верхнем осадочном слое по крайней мере скорость поперечной волны может быть меньше

³⁹ McInerny (ссылка 38). См. также S.A. McInerny et al., "The Influence of Low-frequency Instrumentation Response on Rocket Noise Metrics." *Journal of the Acoustical Society of America* 102 (5 Pt. 1) (Nov. 1997): 2780–2785.

⁴⁰ См., например, Л. М. Бреховский, О. А. Гордин, *Acoustics of Layered Media I - Plane and Quasi-Plane Waves*, Ch. 4. (Springer, Berlin, 1990).

⁴¹ См., например, G. G. Sorrells, "A Preliminary Investigation into the Relationship between Long-Period Seismic Noise and Local Fluctuations in the Atmospheric Pressure Field." *Geophysical Journal* 26 (1–4) (Dec. 1971): 71–82; A. Ben-Menahem, S. J. Singh, *Seismic Waves and Sources*. (Springer, New York, 1981), Section 9.4.3.

скорости звука в воздухе. В этом случае, из-за дисперсии, которая возникает у релеевских волн в слоистом грунте, на определенной частоте фазовая скорость может равняться кажущейся скорости звука вдоль земли, так что сейсмически распространяющееся возбуждение будет конструктивно накладываться на новое связанное с воздухом возбуждение в каждой точке вдоль своего пути⁴². Такая частота в сейсмическом сигнале будет значительно усиливаться. При взрывном источнике в воздухе сигнал на одной частоте начинается после прихода воздушной волны давления. В настоящем случае широкополосного шума большой длительности следует ожидать сильной спектральной линии. Ее частота зависит от локальной слоистой структуры вблизи поверхности и от угла падения, что приводит к увеличению кажущейся скорости волны вдоль земли, так что условие наложения будет выполняться при существенном изменении (обычно, уменьшении) частоты⁴³.

Акустико-сейсмическая передача в особенности сильна, если грунт не замкнут, как скальные породы, или лед, но имеет поры, как обычные осадочные породы. В таком случае изменения давления воздуха сначала проходят в поры с малой скоростью (десятки метров в секунду), так что благодаря рефракции они будут распространяться в грунт практически вертикально. Из-за трения о зернистую основу звук сильно поглощается (с коэффициентом в десятки м⁻¹), приводя основу в движение. Это движение затем распространяется с намного большей скоростью в наклонном направлении⁴⁴. Оно может частично отражаться от границы нижнего слоя и поверхности, и снова от поверхности, внося вклад в развитие сейсмических волн, в особенности, самой сильной релеевской поверхностной волны. Если последней можно будет пренебречь, то говорят о локальной реакции, когда сейсмическое возбуждение зависит только от местного изменения давления воздуха.

Акустико-сейсмическая передача является линейным процессом; пренебрегая осложнениями теории, ее можно описать упрощенным соотношением:

$$v_{Srms}(x, y, z) = kp_{rms}(x, y) \quad (16)$$

между среднеквадратичным давлением звука p_{rms} , действующим в точке (x, y) и результирующей среднеквадратичной скоростью грунта v_{Srms} на глубине z под этой точкой (наиболее часто используется одна вертикальная компонента). На кажущийся фактор передачи k влияет много обстоятельств, среди них: слоистая структура почвы, угол падения, глубина, история возбуждения до прихода в точку (x, y, z) . Из-за частотной зависимости k уравнение (16) часто используется для компоненты сигнала на одной частоте.

В осадочном суглинке, песке и лессе наблюдаются значения фактора зависящего от частоты переноса между 10^{-6} и 10^{-4} (м/с)/Па⁴⁵. На рис. 8 показаны кажущиеся факторы пере-

⁴² Теоретическую трактовку и эксперименты см. в F. Press, M. Ewing, "Ground Roll Coupling to Atmospheric Compressional Waves." *Geophysics* 16, (1951): 416–430; W. M. Ewing, W. S. Jardetzky, F. Press, *Elastic Waves in Layered Media*. (McGraw-Hill, New York 1957), Section 4.7.

⁴³ Это прямо показано в V. M. McCarthy, I. Dalins, "Frequency Shift in Air-Coupled Surface Waves Originated by Rocket Launches," *Journal of Geophysical Research* 76 (29) (Oct. 10, 1971): 7027–7034. See also I. O. Kitov et al., "An Analysis of Seismic and Acoustic Signals Measured From a Series of Atmospheric and Near-Surface Explosions." *Bulletin of the Seismological Society of America* 87 (6) (Dec. 1997): 1552–1562.

⁴⁴ Теория двух типов объемных волн (волн сжатия), быстрой, в которой жидкость в основном движется вместе с твердым телом, и медленной, в которой жидкость в основном движется против него (вращательного (сдвигового) типа) бала развита в M. A. Biot, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range." *Journal of the Acoustical Society of America* 28 (2) (March 1956): 168-178; M.A. Biot, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range." *Journal of the Acoustical Society of America* 28 (2) (March 1956): pp. 179–191. Измерения см., например, в C. J. Hickey, J. M. Sabatier, "Measurements of Two Types of Dilatational Waves in an Air-filled Unconsolidated Sand." *Journal of the Acoustical Society of America* 102 (1) (July 1997), 128–136.

⁴⁵ H. E. Bass et al., "Coupling of Airborne Sound into the Earth: Frequency Dependence." *Journal of the Acoustical Society of America* 67 (5) (May 1980): 1502–1506; J. M. Sabatier et al., "Acoustically Induced Seismic Waves." *Journal of the Acoustical Society of America* 80 (2) (Aug. 1986): 646–649.

носа – отношения между сейсмическими и акустическими спектрами – из измерений автора на немецкой авиабазе с покрытой травой песчаной почвой, с использованием шума от взлетающего на форсаже истребителя-бомбардировщика Торнадо в качестве источника. Как и ожидалось, вблизи от поверхности сейсмическое возбуждение сильнее. Максимум около 10 Гц (абсолютная величина слишком велика для геофона на глубине 0,6 м), вероятно, связан с релеевской волной, распространяющейся в фазе со звуком. Этот результат также показывает, что для оценки по порядку величины для осадочных пород, близких к поверхности, можно использовать фактор передачи $k \approx 10^{-5}$ (м/с)/Па (конечно, на большей глубине сейсмическая амплитуда и k значительно меньше). Размещение сейсмометров в глубоких скважинах является основным методом уменьшения акустического и ветрового сейсмического шума (а также другого шума, имеющего отношение к поверхности) при чувствительных измерениях⁴⁶.

Интуитивно, меньшей передачи от акустического давления в сейсмические колебания следует ожидать, если грунт тверд, или покрыт мягким материалом. Граничными случаями могут быть, с одной стороны, скальная порода, с другой – снежное покрытие.

Для случая голых скальных пород, где можно ожидать слабой связи из-за прочного материала и отсутствия пор, измерения в литературе не были найдены. Ближайшим случаем является «скальное обнажение», которое, тем не менее, было покрыто слоем глины примерно в 2 м, где для звуковых ударов была измерена величина $1,5 \cdot 10^{-6}$ (м/с)/Па⁴⁷. Для чистой скалы без слоя обветривания фактор может быть меньше, однако, это случай не имеет отношения к делу, поскольку шахты МБР в основном строятся в осадочных породах. Если потребуются обнаруживать запуски ракет датчиками в голых скалах, то можно будет легко провести калибровочные измерения фактора передачи. Даже если фактор будет меньше, чем 10^{-6} (м/с)/Па на один или два порядка величины, надежное обнаружение все еще будет возможно, поскольку все другие колебания, связанные с воздухом, будут ослаблены точно так же. В качестве средства последней надежды можно будет расположить датчик ближе к шахте.

С другой стороны, снежное покрытие не сильно изменяет фактор передачи. Для 11 различных типов снега были измерены значения от $2 \cdot 10^{-6}$ до $1,6 \cdot 10^{-5}$ (м/с)/Па⁴⁸. Даже хотя грунт может упрочниться от мороза и его поры могут быть закрыты льдом, пористый снег представляет большую площадь для взаимодействия воздуха и грунта. Однако, из-за акустической мягкости, акустическое давление над снегом будет уменьшаться сильнее; для горизонтального падения на расстояниях более 200 м наблюдалось в 10 раз меньшее звуковое давление и скорость в грунте⁴⁹. С другой стороны, влияние земли будет сильно уменьшаться по мере увеличения угла места источника, как это происходит в случае запуска ракеты с расстояния меньше нескольких километров.

⁴⁶ См., например, H. K. Given, "Variations in Broadband Seismic Noise at IRIS/IDA Stations in the USSR with Implications for Event Detection." *Bulletin of the Seismological Society of America* 80 (6) (Dec. 1990): 2072–2088; J. A. Carter et al., "High-Frequency Seismic Noise as a Function of Depth." *Bulletin of the Seismological Society of America* 81 (4) (Aug. 1991): 1101–1114.

⁴⁷ J. A. McDonald, T. G. Goforth, "Seismic Effects of Sonic Booms: Empirical Results." *Journal of Geophysical Research* 74 (10) (May 15, 1969): 2637–2647.

⁴⁸ D. G. Albert, "Acoustic Waveform Inversion with Application to Seasonal Snow Covers." *Journal of the Acoustical Society of America* 109 (1) (Jan. 2001): 91–101.

⁴⁹ D. G. Albert, J. A. Orcutt, "Acoustic Pulse Propagation above Grassland and Snow: Comparison of Theoretical and Experimental Waveforms." *Journal of the Acoustical Society of America* 87 (1) (Jan. 1990): 93–100; see also Albert 2001 (Note 47) and D. G. Albert, L.R. Hole, "Blast Noise Propagation above a Snow Cover." *Journal of the Acoustical Society of America* 109 (6) (June 2001): 2675–2681.

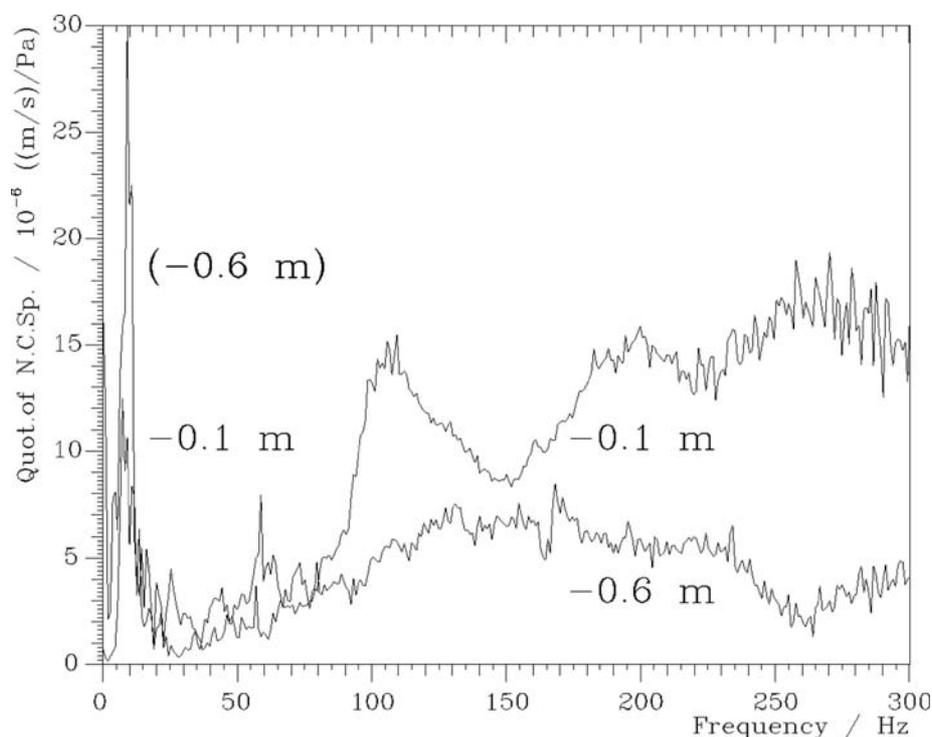


Рис. 8. Зависимость фактора акустико-сейсмической передачи для плоской покрытой травой земли от частоты (по горизонтали, в Гц): отношение сейсмических и акустических амплитудных спектров (по вертикали, в 10^{-5} (м/с)/Па) на глубинах 0,1 и 0,6 м (микрофоны находились на высоте 0,3 м), для сигналов, измеренных, соответственно, на расстояниях в 95 и 145 м от центральной линии взлетно-посадочной полосы во время взлета истребителя-бомбардировщика Торнадо с форсажной камерой. Абсолютная величина комплексных отношений спектров с перекрытием 87,5%, общей продолжительностью 4,8 с в течение интервала наиболее близкого прохождения. Кажущиеся высокие значения около 10 Гц для геофона на глубине -0,6 м являются артефактом, вызванным нижней частотой обрезания микрофона в 20 Гц (у другого микрофона эта частота была равна 2 Гц). Собственные измерения, Бохумский проект по верификации, 2 февраля 1995 г., бывшая немецкая авиабаза Jever-Schortens. Измерения описаны и первые расчеты фактора передачи представлены в работе R. Blumrich, *Sound Propagation and Seismic Signals of Aircraft Used for Airport Monitoring. Verification – Research Reports, no. 10, ISL, Hagen (1998)*. См. также R. Blumrich, J. Altmann, “Aircraft Sound Propagation Near to the Ground: Measurements and Calculations.” *ACUSTICA – acta acustica* 85 (4) (1999): 495–504.

СООБРАЖЕНИЯ ПО ДЕТЕКТИРОВАНИЮ И ДИСКРИМИНАЦИИ

Для того, чтобы оценить надежность системы обнаружения запуска ракет, следует рассмотреть вероятность обнаружения и частоту ложных тревог. Первая имеет отношение к фоновому шуму, который может приходиться из воздуха, или от земли (шум в электронике может быть сделан ниже, чем эти составляющие). Ложные тревоги в основном могут появляться от сильных источников. В сейсмическом отношении следует подумать о землетрясениях и транспортных средствах, проезжающих на малых расстояниях; самыми возможными источниками являются гром, самолет, и наземные транспортные средства. Эти и другие источники рассматриваются в следующих разделах.

Акустический фон

Антропогенный шум от городов или промышленности не имеет отношения к делу. Уровни звука от работы, двигателей, и т.п. внутри шахты на много порядков величины слабее шума при запуске. Типичные среднеквадратичные значения фонового звукового давления (в

полосе 3 – 10 000 Гц) примерно равны 10^{-3} Па⁵⁰. с типичным значением $k \approx 10^{-5}$ (м/с)/Па это приведет к пренебрежимо малым колебаниям почвы со скоростью 10^{-8} м/с.

Сейсмический шум

Обычный сейсмический шум возникает от далеких землетрясений, океанских волн, метеорологического воздействия, и влияния деятельности человека (транспорта, промышленности, и т.п.). В удаленных районах с датчиками, связанными со скальным грунтом, консервативные низкие и высокие оценки среднеквадратичной скорости грунта в диапазоне частот 1 – 100 Гц таковы: $9 \cdot 10^{-10}$ и $6 \cdot 10^{-6}$ м/с, соответственно⁵¹. Последняя величина, по-видимому, слишком высока; в наших измерениях в осадочных породах с геофонами, заглубленными на 10 см, среднеквадратичная скорость грунта составляла $6 \cdot 10^{-7}$ м/с в течение дня, и $3 \cdot 10^{-7}$ м/с ночью (диапазон от 3 до 300 Гц)⁵².

Наиболее важным природным источником будет сильный переменный ветер, который, однако, не приводит к существенному перемещению почвы, если поверхность является гладкой. При измерениях с редкой растительностью была измерена среднеквадратичная скорость порядка 10^{-7} м/с при самой высокой наблюдавшейся скорости ветра в 10 м/с⁵³. Более сильные колебания возникают там, где имеются образования, такие как деревья, или мачты, которые прилагают к земле значительные силы. В лесу с соснами высотой около 10 м мы наблюдали повышенную среднеквадратичную скорость в 10^{-6} м/с (по сравнению с $3 \cdot 10^{-7}$ м/с) в течение дождливой и ветреной ночи, когда средняя скорость ветра (измеренная на расстоянии 14 км на высоте 16 м, за пределами леса) была примерно равна 5 м/с с порывами до 11 м/с⁵⁴. При более сильном ветре могут возникнуть еще большие значения. При возбуждении движением деревьев или мачт в спектре могут проявляться их частоты, так что

⁵⁰ J. Altmann, S. Linev, A. Weiss, "Acoustic-Seismic Detection and Classification of Military Vehicles—Developing Tools for Disarmament and Peace-keeping." *Applied Acoustics* 63 (10) (Oct. 2002): 1085–1107; S. Linev, J. Altmann, A. Weiß, "Monitoring for Verification—Acoustic-Seismic Military-Vehicle Measurements of 2000 at Meppen, Germany." In: *Verification - Research Reports*, no. 11, Grunberg, Lenzen (2001).

⁵¹ P. Bormann, "Conversion and Comparability of Data Presentations on Seismic Background Noise." *Journal of Seismology* 2 (1) (1998): 37–45. Значения были рассчитаны из спектральной плотности скорости при 10 Гц, $4,1 \cdot 10^{-21}$ и $1,8 \cdot 10^{-13}$ (м/с)²/Гц для низкого и высокого шума, соответственно. Таблицы воспроизведены из J. Peterson, "Observation and Modeling of Seismic Background Noise." U. S. Geological Survey Open-File Report 93-322 (1993). Умножение на 2 и на ширину полосы в 100 Гц дает средние квадраты скоростей $8,2 \cdot 10^{-19}$ and $3,6 \cdot 10^{-11}$ (м/с)², и квадратный корень дает среднеквадратичные квадраты скоростей [см. K. Aki, P. G. Richards, *Quantitative Seismology - Theory and Methods, vol.1*. Freeman: New York (1980), Section 10.2]. Это явная переоценка, поскольку при увеличении частоты выше 10 Гц спектральная плотность уменьшается.

⁵² Altmann/Linev/Weiss (ссылка 50), Linev/Altmann/Weiss (ссылка 50).

⁵³ M. M. Withers et al., "High-Frequency Analysis of Seismic Background Noise as a Function of Wind Speed and Shallow Depth." *Bulletin of the Seismological Society of America* 86 (5) (Oct. 1996): 1507–1515. Использование их спектральных плотностей смещения при средней скорости ветра на поверхности 10 м/с около $0,003$ нм²/Гц (–25 дБ против нм²/Гц), умноженных на 2 и ширину полосы 30 Гц приводит к среднему квадрату смещения $0,2$ нм² и среднеквадратичному значению $0,4$ нм (см. Aki/Richards (ссылка 51), Section 10.2). Умножая последнее значение на 2π 50 Гц (они измеряли до 60 Гц), получим среднеквадратичную скорость $0,2$ мкм/с. При скорости ветра 6 м/с, амплитуда будет примерно в 6 раз меньше. Вызванная ветром сейсмическая амплитуда заметно уменьшается при заглублении геофонов (до 1/10 при –43 м), но в настоящем контексте надо размещать геофоны очень близко к поверхности. См. также С. J. Young et al., "A Comparison of the High-Frequency (> 1 Hz) Surface and Subsurface Noise Environment at Three Sites in the United States." *Bulletin of the Seismological Society of America* 86 (5) (Oct. 1996): 1516–1528; Carter et al. (ссылка 46); Given (ссылка 46).

⁵⁴ Altmann/Linev/Weiss (ссылка 50), Linev/Altmann/Weiss (ссылка 50). Скорость ветра в течение 35-минутного периода показана на Рис. 6, соответственно рис. 6.10 из этих ссылок рассчитанного для этой работы.

он будет явно отличаться от спектра запуска. Тем не менее, площадки для датчиков следует выбирать таким образом, чтобы кусты, деревья, мачты, и тому подобное, находились на достаточно большом расстоянии (оптимально в несколько сотен метров). Объекты с меньшей высотой и малым сопротивлением ветру (забор, небольшая спутниковая антенна) могут, вероятно, располагаться в непосредственной близости.

Землетрясения

Землетрясения приводят к очень большим перемещениям земли вблизи своих эпицентров: на расстоянии нескольких километров от плоскости разлома наблюдались ускорения более 10 м/с^2 , соответствующие скорости выше 20 м/с при доминирующей частоте 3 Гц ⁵⁵. Это намного больше, чем у движений, вызванных шумом при запуске, даже в точке запуска (см. рис. 11), так что типичные для запуска амплитуды будут достигнуты на больших расстояниях от источника. Однако, на таких расстояниях сигнал будет коротким событием продолжительностью в несколько секунд с фактически одним сильным циклом, и с соответствующей доминантной частотой ниже 1 Гц ⁵⁶. На больших расстояниях сигнал типичного сейсмического события состоит из последовательно прибывающих продольных, поперечных, и поверхностных волн с различными отраженными компонентами (то же самое относится и к взрывам). Оба типа будет легко отличить от вибраций от шума запуска, используя временной ход сигнала и его спектр. Поскольку районы МБР располагаются глубоко внутри континентальных плит, в любом случае близкие землетрясения будут очень редкими.

Гром⁵⁷

При ударе молнии образуется плазменный канал, нагреваемый электрическим разрядом с линейной плотностью энергии порядка $0,2 \text{ МДж/м}$, с типичной длиной канала несколько километров, и с высвобождением энергии около 1 ГДж . Из этой энергии несколько десятых долей процента преобразуется в акустическое излучение; в одном исследовании акустическая энергия, определенная из наблюдаемого потока мощности и расстояния, составляла $1 - 15 \text{ МДж}$ для наземных вспышек и $2 - 3 \text{ МДж}$ для вспышек внутри облаков⁵⁸. Исходящая волна давления образуется как сильная ударная волна (избыточное давление намного выше давления окружающего воздуха). Геометрическое ослабление и сильное поглощение затем приводят к ее превращению в слабую ударную волну (разность избыточного и окружающего давления много меньше окружающего давления), у которой все еще наблюдается сильное поглощение. В дальнейшем резкий скачок давления сглаживается, импульсы давления становятся скругленными, и превалирует линейное распространение с молекулярным поглощением (сильно увеличивающимся с частотой, и наиболее важным выше 100 Гц); с дополнительным зависящим от частоты поглощением из-за скользящего падения на пористую землю, и рефракцией, как это было описано ранее. Плазменный канал извилист и разветвляется; кроме того, он имеет большую дину и поэтому акустические волны, образующиеся существенно одновременно в различных частях, приходят к детектору в различное время. В зависимости от длины и геометрии канала по отношению к приемнику, разность времени прихода от различных частей канала может превышать 10 с . Типичная продолжительность грома равна $5 - 20 \text{ с}$, обычно с несколькими пиками амплитуды. Спектры являются широкополосными с максимумом от ниже 4 Гц до 125 Гц . На малых расстояниях гром короткий, интенсивный, и содержит высокие частоты (раскаты, удары). На больших расстояниях гром длится

⁵⁵ Aki/Richards (ссылка 51), Section 10.2.

⁵⁶ См., например, Рис. 14.17 в K. Aki, P. G. Richards, *Quantitative Seismology – Theory and Methods*, vol. II. (Freeman, New York, 1980).

⁵⁷ Bhartendu, "A Study of Atmospheric Pressure Variations from Lightning Discharges." *Canadian Journal of Physics* 46 (4) (Feb. 15, 1968): 269–281; C. R. Holmes et al., "On the Power Spectrum and Mechanism of Thunder." *Journal of Geophysical Research* 76 (9) (March 20, 1971): 2106–2115; R. D. Hill, "Thunder." in R. H. Golde (ed.), *Lightning*, vol. 1, *Physics of Lightning*. (Academic, London, 1977); A. A. Few, Jr., "Acoustic Radiations from Lightning." In *CRC Handbook of Atmospherics*, vol. II. (CRC Press, Boca Raton FL, 1982).

⁵⁸ Holmes et al. (ссылка 57).

дольше, доминируют низкие частоты, и амплитуды невелики (рокот). Из-за зоны тени рефракции, дальность обычно не превышает 25 км. Используя линейное сферическое распространение с расстоянием до первого прихода r , и пренебрегая поглощением, можно получить выражение для поверхностной плотности энергии:

$$(E/A)(r) = E_{ac} / (4\pi r^2) \quad (17)$$

Энергия

$$E(r) = P(r)\Delta t \quad (18)$$

распределена по временному интервалу Δt , так что акустическая интенсивность $I(r)$ (равная поверхностной плотности средней мощности $P(r)$) и среднеквадратичное давление $p_{rms}(r)$ становятся равными⁵⁹:

$$I(r) = p_{rms}^2(r) / (\rho_0 c_s) = (E/A)(r) / \Delta t \quad (19)$$

$$p_{rms} = [E_{ac} \rho_0 c_s / (4\pi r^2 \Delta t)]^{1/2} \quad (20)$$

Подставляя нижние и верхние значения E_{ac} 1 и 15 МДж и длительности Δt 1 и 2 с, получаем среднеквадратичные значения давления между 4,0 и 22 Па, соответствующие заявлению о том, что на расстоянии в 1 км давление обычно меньше 10 Па⁶⁰. При 3 км для 2 и 5 с интервал давлений составляет от 0,84 до 5,2 Па, а при 10 км для 5 и 10 с – от 0,18 до 0,98 Па. Эти значения использовались для выделения области грома на рис. 11. одиночные пики давления в этих интервалах, конечно, будут больше, чем эти среднеквадратичные значения.

Сейсмические записи трех ударов грома показаны на рис. 9⁶¹. они показывают, что сигнал состоит из нескольких пиков амплитуды. 13 наблюдавшихся событий имели максимальную амплитуду в 1 – 8 микрон/с и продолжительность от 5 до 33 с, разряд молнии находился на расстоянии около 5 км. Поскольку сигналы были измерены на сейсмической станции случайно, не было проведено никаких акустических измерений. Используя уравнение (20) с $E_{ac} = 10$ МДж и $\Delta t = 15$ с, получаем $p = 0,85$ Па. Оценивая пиковое давление в четыре раза большим этого значения, и используя среднюю пиковую скорость грунта в 5 микрон/с, кажущийся фактор акустико-сейсмической передачи будет равен $1,5 \cdot 10^{-6}$ (м/с)/Па. Это меньше, чем типичное значения для пористого грунта, то оно соответствует структуре грунта на станции: гранит с выветрившимся слоем толщиной 1 м сверху; сейсмометр располагался на бетонном основании, прикрепленном к сплошному граниту. Обобщая, можно заявить, что на малом расстоянии (менее нескольких километров) сигналы грома могут быть сильными, но показывают нерегулярную структуру с одним или более пиками, отличным от гладкого профиля запуска ракеты на расстояниях менее нескольких километров. Гром с больших расстояний (рокот) будет иметь в основном нерегулярную структуру, но, в редких случаях он может оказаться похожим на профиль от запуска. Однако, максимальная амплитуда будет малой. Анализ формы профиля и максимальной амплитуды будет достаточен для дискриминации. Если потребуется большая надежность, можно будет добавить спектральные характеристики, смотреть на задержки распространения от разных шахт, или включать определение направления, устанавливая по несколько датчиков на каждой площадке. Могут быть сделаны также добавление антенны и оценка электромагнитного сигнала от молнии, но это не кажется необходимым.

⁵⁹ Эта упрощенная модель предполагает независимое наложение всех приходящих волн и пренебрегает более длинными путями распространения для более поздних. См. также Holmes et al. (ссылка 57).

⁶⁰ Hill (ссылка 57), p. 395.

⁶¹ M. E. Kappus, F. L. Vernon, "Acoustic Signature of Thunder from Seismic Records." *Journal of Geophysical Research* 96 (D6) (June 20, 1991): 10 980–11 006.

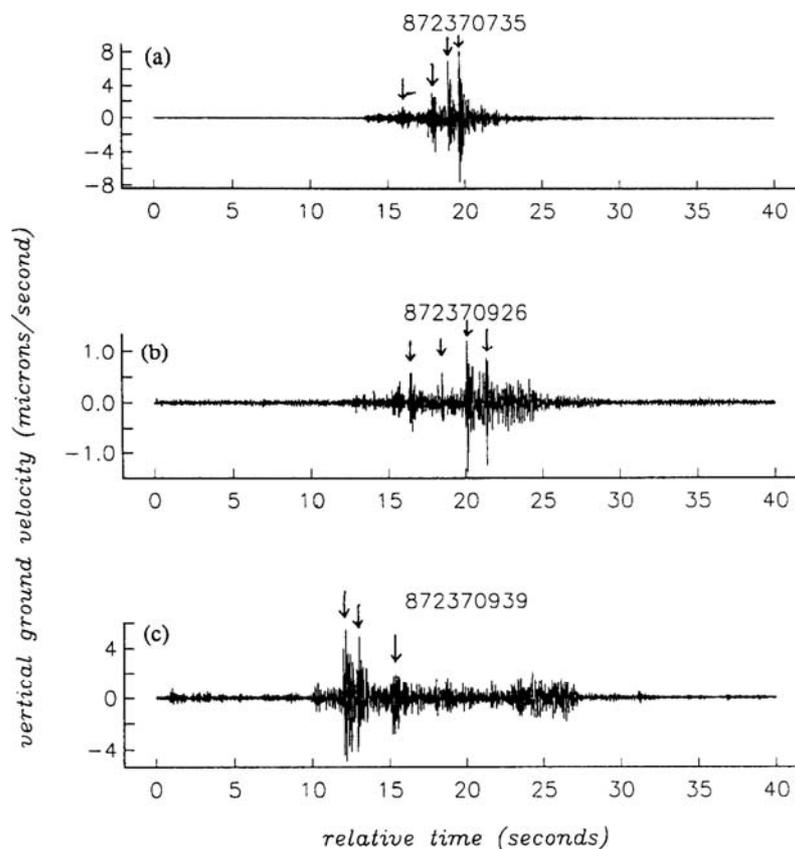


Рис. 9. Вертикальные составляющие наземной скорости (по вертикали в микронах в секунду) в зависимости от времени (в секундах) во время трех ударов грома от молнии на расстоянии приблизительно в 5 км. Числа обозначают год, юлианскую дату, время. Сигналы имеют нерегулярную форму, можно видеть отдельные раскаты. Из работы Karpus/Vernon 1991 (ссылка 61). Авторские права 1991 American Geophysical Union, воспроизводится с разрешения American Geophysical Union.

Пролетающий сверху самолет

Даже хотя доступ в воздушное пространство над базами МБР, вероятно, будет ограничен, нельзя исключить пролета военного самолета над ними – многие базы построены вокруг авиабаз. Их шум можно перепутать с шумом ракет только тогда, когда он будет достаточно сильным, т.е., если высота полета будет мала. Гражданские реактивные лайнеры шумят намного слабее, и не могут летать на малой высоте, за исключением взлетов и посадок. Винтовые самолеты и вертолеты могут быть легко исключены при анализе спектра, который, благодаря периодическому источнику, состоит в основном из линий гармоник⁶². подобный вид широкополосного спектра создают только реактивные двигатели. Сверхзвуковой полет можно также отличить по типичной N-образной волне. Она состоит из резкой ударной волны с избыточным давлением, почти линейному уменьшению давления, за которым следует резкое увеличение давления до нормального⁶³. Для горизонтального полета длительность задается длиной самолета, поделенной на его скорость – при 15 м и более 330 м/с, меньше 50 мс⁶⁴. широкополосный шум, в целом подобный шуму от ракеты, создается дозвуковым реак-

⁶² Например, Blumrich (ссылка 1 на рис. 8); M. V. Lowson, J. B. Ollerhead, "A Theoretical Study of Helicopter Rotor Noise." *Journal of Sound and Vibration* 9 (2) (1969): 197–222.

⁶³ Например, J. C. Cook, T. Goforth, R. K. Cook, "Seismic and Underwater Responses to Sonic Boom." *Journal of the Acoustical Society of America* 51 (2 pt. 3) (1972): 729–741; J. E. Cates, B. Sturtevant, "Seismic Detection of Sonic Booms." *Journal of the Acoustical Society of America* 111 (1 pt. 2) (Jan. 2002): 614–628.

⁶⁴ Конечно, кажущаяся наземная скорость и длительность N-волны изменяются с углом спуска и подъема.

тивным самолетом. Это демонстрируется рис.10 для пролетов истребителей-бомбардировщиков на минимальном расстоянии 200 м; длительность сигнала, временной ход амплитуды, и абсолютная максимальная амплитуда сравнимы, по крайней мере, когда включена форсажная камера. Отметим, однако, что максимум для самолета на расстоянии 200 м равен только 1/5 от максимума для ракеты на расстоянии 500 м на рис. 7. Если сравнить с этим рисунком, то здесь очевидно более симметричное увеличение и уменьшение. Спектральный максимум (здесь он выше 100 Гц по сравнению с 30-40 Гц на рис. 5) тоже может дать указание. Однако, эти характеристики не являются достаточно надежными для дискриминации. Для лучшего распознавания низколетящего дозвукового реактивного самолета представляется полезным включение сигналов от нескольких источников. В случае больших взаимных расстояний временная последовательность соответствующих пиков амплитуды дает указание, если траектория более или менее наклонна, или вертикальна. С датчиками на близких расстояниях можно определить направление на источник по фазам волн; для вертикального запуска угол азимута постоянен, в то время как у самолета он меняется во времени. Случай вертикального взлета самолета рядом с датчиками исключительно маловероятен, но его, вероятно, можно отличить по намного меньшему ускорению и скорости подъема.

Проезжающие транспортные средства

Систематические измерения в Бохумском проекте по верификации показали, что самое сильное сейсмическое возбуждение производится транспортными средствами на рельсах с типичными пиковыми скоростями грунта в несколько раз большими 10^{-3} м/с на расстоянии в 10 м и 10^{-3} м/с – на 100 м, с уменьшением с расстоянием быстрее $1/r$; возмущения от тяжелых грузовиков в 30 раз меньше. Акустическая амплитуда уменьшается как $1/r^{65}$. Транспортные средства на рельсах не ожидаются поблизости от шахт МБР (за исключением, может быть, случая гражданской войны). Их сейсмические сигналы являются квазипериодическими из-за шума двигателя, взаимодействующего с грунтом, и колес, катящихся по сегментам рельсов⁶⁶. Таким образом, в спектре будут сильные компоненты линий, которые могут быть легко отличены от шума запуска. Более реальными являются грузовики; временной ход амплитуды может в принципе быть аналогичным запуску ракеты, если транспортное средство движется по прямой линии с постоянной скоростью, проходя от датчика на соответствующем расстоянии. Однако, здесь в сейсмическом спектре будут присутствовать доминирующие линии, появляющиеся от двигателя, которые могут служить для отличия⁶⁷.

⁶⁵ J. Altmann, "Acoustic and Seismic Signals of Heavy Military Vehicles for Cooperative Verification." *Journal of Sound and Vibration* 273 (4–5) (21 June 2004): 713–740; W. Kaiser, *Sound and Vibration from Heavy Military Vehicles—Investigations of Frequency Assignment and Wave Spreading with Respect to Monitoring under Disarmament Treaties*. Verification - Research Reports, no. 9, ISL, Hagen (1998).

⁶⁶ Altmann (ссылка 65), Figure 8; Kaiser (ссылка 65), Section 3.2.2.

⁶⁷ Конечно, структура линии более проявляется в акустических спектрах, но, тем не менее, она может быть видна и в сейсмических, см. Kaiser (ссылка 65), Section 3.2.2; Altmann (ссылка 65).

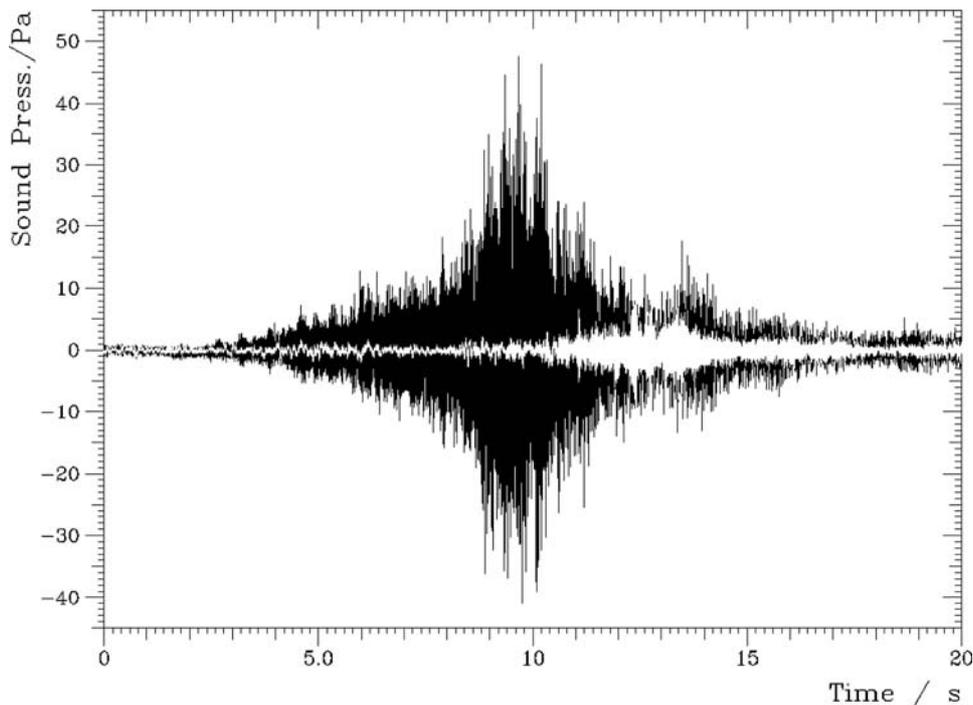


Рис. 10. Акустический сигнал на земле от дозвукового пролета военного реактивного самолета по вертикали – звуковое давление в Па, по горизонтали – время с произвольным отсчетом в с). Истребители-бомбардировщики Торнадо летят по прямой линии с минимальным расстоянием 200 м. Черный цвет: форсажная камера включена, скорость около 140 м/с, проходит на расстоянии 100 – 150 м по горизонтали с минимальным расстоянием 150 – 250 м. Белый цвет: форсажная камера выключена, скорость около 110 м/с, проходит над головой на высоте 200 м. Наши измерения, Бохумский проект по верификации, 2 февраля и 31 января 1995 года, бывшая немецкая военная база Jever-Schortens. Пролет над головой с выключенной форсажной камерой на высоте 200 м анализировался в работе R. Blumrich, J. Altmann, “Medium-range localisation of aircraft via triangulation.” *Applied Acoustics* 61 (1) (Sept. 2000): 65–82 (figure 7). Для другого полета триангуляция не проводилась, скорость оценивалась по задержке в 1,1 с между максимумами для двух микрофонов, расположенных на расстоянии 150 м. Вероятно, полет проходил прямо над взлетной полосой, центральная линия которой находилась на расстоянии 150 м от микрофонов. Измерения описаны в той же работе (figure 8).

Сводка результатов

Зависимости амплитуды от расстояния до соответствующих источников скомбинированы на рис. 11. Здесь показано максимальное ожидаемое среднеквадратичное звуковое давление (на левой оси ординат) в зависимости от расстояния (по горизонтали от точки запуска баллистических ракет и наклонное для других источников). Пиковые значения могут быть больше в 3 – 6 раз. На правой оси ординат показана результирующая среднеквадратичная скорость грунта при коэффициенте передачи 10^{-5} (м/с)/Па; фактически она может отличаться на множитель от 0,1 до 10. Поскольку эти изменения одинаково влияют на все акустические источники, абсолютное значение не важно, до тех пор, пока амплитуда остается достаточно высокой для того, чтобы превышать сейсмический шум неакустического происхождения.

Для МБР использовалась простая линейная модель с акустической мощностью 5 и 25 МВт (аналогичная мощности Minuteman III, и несколько большая мощности Peacekeeper, см. приведенную выше информацию). На малых расстояниях звуковое давление будет больше показанного до тех пор, пока сильное нелинейное поглощение не сократит скачки давления. Для всех источников на больших расстояниях рефракция может существенно увеличить или уменьшить давление. Рефракция и другие эффекты, не учитываемые в модели, могут привести к отклонению порядка 0,3 или 3 между, скажем, 0,2 и 20 км. Гром также оценивался по простой модели с использованием приведенных выше значений. Для реактивного самолета типичные среднеквадратичные значения на расстоянии 100 м оценивались из наших изме-

рений (с форсажной камерой и без нее⁶⁸, см. также рис. 10), и экстраполировались в предположении только геометрического ослабления. Значения для тяжелых и средних грузовиков были также взяты из наших измерений⁶⁹, сейсмические значения отнесены к правой оси ординат.

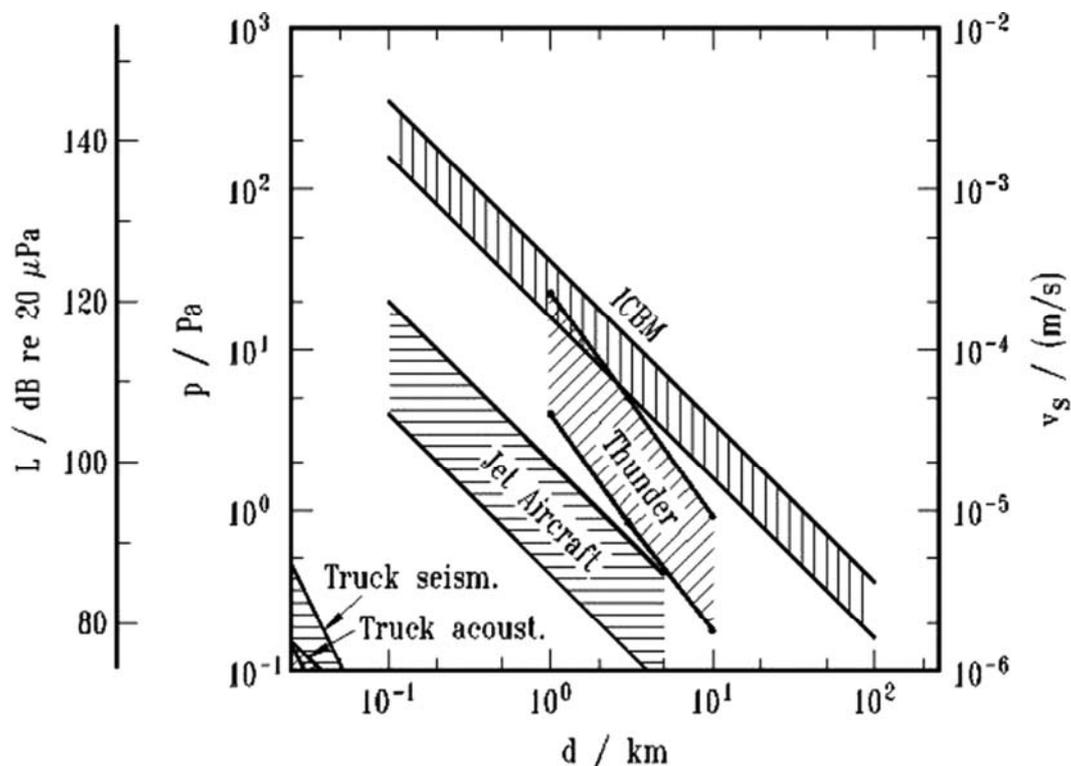


Рис. 11. Оценки зависимости максимального среднеквадратичного звукового давления от горизонтального расстояния от точки запуска и от наклонного расстояния до других источников (см. текст). На крайней левой вертикальной оси уровень шума в дБ по отношению к 20 мкПа; на левой вертикальной оси давление в Па; на правой вертикальной оси скорость грунта в м/с; на горизонтальной оси расстояние в км. Надписи на рисунке (сверху вниз и справа налево): МБР, гром, реактивный самолет, грузовик (сейсмический), грузовик (акустический). МБР, гром: простые модели; реактивный самолет, грузовики: сводка наших измерений. В предположении фактора передачи 10^{-5} (м/с)/Па звуковое давление приводит к скорости грунта, показанной на правой шкале. Сейсмические значения для грузовиков соответствуют этому масштабу.

Скорость перемещения грунта под действием ветра по порядку величины составляет 10^7 м/с на гладкой местности без высоких растений или других структур, и может в несколько раз превышать 10^6 м/с при наличии деревьев; другой сейсмический шум может лежать в диапазоне от 10^{-9} м/с до несколько раз больше 10^{-6} м/с. Консервативно принимая верхний предел в 10^{-5} м/с, амплитуда от запуска ракеты будет превышать это значение на расстояниях в несколько раз больших 10 км (за исключением случая рефракции вверх).

Критерий для максимально допустимого расстояния датчика от шахты МБР может быть определен из двух источников, следующих по силе. Даже если для дискриминации могут быть использованы дополнительные критерии, хотелось бы иметь очевидное различие в амплитуде. Возможно ли это?

Для дозвукового реактивного самолета самым худшим предположением может быть пролет сверху с включенной форсажной камерой (верхняя граница диапазона амплитуды) на высоте 30 м, что приводит к максимальному среднеквадратичному давлению 70 Па. Эта величина пересекается с нижней границей для МБР на 230 м, и с верхней границей на 520 м. Требуемый фактор амплитуды между МБР и самолетом зависит от вероятности таких

⁶⁸ Blumrich (примечание 1 на рис. 8).

⁶⁹ Altmann (ссылка 65).

пролетов, типа ракеты, и надежности дискриминации с использованием других критериев. Если стремиться к фактору 2, то сейсмический датчик (датчики) должен быть расположен не далее 115 м. Однако, даже тогда пролет на высоте 15 м создаст такую же максимальную среднеквадратичную скорость грунта, в любом случае демонстрируя необходимость включения других критериев (в данном случае это легко, поскольку сигнал будет оставаться выше половины своего максимума только 0,5 с).

Что касается грома, сигналы на малом удалении могут быть громче, чем от запуска ракеты. Однако, первые можно отличить по малой длительности и возможным нескольким пикам амплитуды. Длительность около 10 с с плавным увеличением и уменьшением ожидается только от небольшой части удаленных событий. Принимая 5 км как нижнюю границу для такого расстояния можно прийти к верхнему пределу в 3 Па. Требуя, чтобы амплитуда от запуска была в 10 раз больше этого значения, датчики должны соответственно находиться на расстоянии от 500 м до 1,1 км от шахты.

Оба аргумента предполагают, что датчик (датчики) не должны быть дальше нескольких соте метров, или 1 километра. Если это обеспечено, то грузовик не будет представлять проблему амплитуды даже при прохождении на расстоянии 20 м. чем короче расстояние, тем лучше будет возможность дискриминации по одной амплитуде; нижний предел будет определяться сигналами от нормальной работы в шахте, и мотивами ограничения вмешательства. Поэтому расстояние датчика между 100 и 500 м кажется подходящим.

Это приводит к непосредственным последствиям для количества площадок датчиков. Для того, чтобы предотвратить повреждение нескольких шахт от одного ядерного взрыва, шахты МБР разносят далеко друг от друга. Например, на схеме базы МБР Гранд-Форкс (Северная Дакота), которая, вероятно, была представлена США Российской Федерации по договору СНВ-1, шахты находятся на расстоянии 10 км друг от друга⁷⁰. Поэтому для каждой шахты потребуется одна площадка с датчиками. Покрытие всей группы шахт или даже базы одной площадкой датчиков невозможно, если добиваться однозначно сильных амплитуд.

Дополнительная информация от расположения нескольких датчиков

Для того, чтобы предоставить дополнительную информацию, которая может потребоваться для надежной дискриминации, можно будет использовать несколько сейсмических датчиков на каждой площадке вместо одного. Это также создает резервирование, которое может уменьшить последствия отказа в одном канале. В принципе можно использовать комбинацию трех датчиков с ортогональными чувствительными осями, измеряющими три пространственные компоненты перемещения грунта. Ее основной ориентацией должна находиться в вертикальной плоскости, соединяющей источник и датчик, так, чтобы можно было оценить азимут направления на источник. Однако, местные неоднородности грунта могут привести к появлению заметной продольной компоненты, что делает эту оценку ненадежной.

Хотя трехмерное движение грунта дает интересную информацию и может быть дополнительно учтено, если расходы на датчики и обработку не будут сильно ограничены, более перспективной альтернативой является использование трех (или, может быть, более) датчиков, которые удалены друг от друга на расстояние от нескольких метров до нескольких десятков метров. Нужно будет измерять только вертикальную компоненту перемещения грунта. Скорость и направление возбуждения грунта вдоль такой решетки может быть определено методом кросс-корреляции, максимумы предоставят разности времени между парами аналогичных сигналов, приходящих к датчикам. Из этого можно будет определить согласованный двумерный вектор скорости, который объяснит задержки. Альтернативно, можно будет просуммировать сигналы после вычитания теоретических задержек от предполагаемого вектора скорости (формирование пучка). В области, покрытой возможными векторами, правильный вектор покажет максимальную сумму сигналов, поскольку здесь все сигналы датчиков будут складываться когерентно. Оба метода дают азимут источника и кажущуюся ско-

⁷⁰ См. <http://www.globalsecurity.org/wmd/facility/images/gfafb.gif> (Oct. 1, 2004); масштаб диаграммы на сайте можно получить из сравнения положения городов на обычной карте Северной Дакоты.

рость волны v_G вдоль грунта. Поскольку вызванный звуком сигнал

$$v_G = c_s / \sin \vartheta \quad (21)$$

где угол падения волны с вертикалью равен углу излучения волны от оси факела ϑ , то можно оценить угол возвышения источника ($90^\circ - \vartheta$). Если источник – это ракета из ближайшей шахты, то горизонтальное расстояние известно, так что можно будет определить траекторию в трех измерениях до высоты, в несколько раз превышающей расстояние от шахты до источника. Можно получить более высокую точность, если будут измерены и включены температура воздуха и скорость ветра. Однако, они, вероятно, не понадобятся для подтверждения вертикально движущегося источника (постоянный азимут, увеличивающееся наклонение) с примерно постоянным (увеличивающимся) ускорением.

Рекомендуемый размер решетки можно оценить из того соображения, что сигнал на одном датчике должен существенно измениться по фазе, когда волна достигнет самого удаленного датчика; если потребовать изменения в 180° , или π , то расстояние должно превышать половину длины волны используемой компоненты сигнала. Напротив, если следует избежать неоднозначностей от нескольких волн, то минимальное расстояние должно быть меньше одной длины волны. Смотря на частоты f между 20 и 100 Гц и кажущиеся скорости волны c_G между 330 м/с (горизонтальное распространение) и 730 м/с (возвышение 63° , высота вдвое больше расстояния до шахты), получаем длины волн вдоль поверхности $\lambda_G = c_G/f$ между 3,3 и 37 м. В простейшем случае трех датчиков в вершинах равностороннего треугольника расстояние должно быть от 2 до 40 м. Подходящее значение зависит также от частоты опроса цифровых сигналов f_s ; без специальных мер минимальное значение задержки, которое может быть определено, равно одному периоду опроса T_s . Изменение задержки с углом минимально сразу же после запуска, вблизи $\vartheta = 90^\circ$. При $T_s = 5$ мс и $d = 2$ м, первый шаг задержки возникает только тогда, когда ракета поднимается до угла возвышения в 80° ($\vartheta = 10^\circ$); при 1 мс и 40 м это происходит уже при возвышении в 7° . Поэтому последние значения являются предпочтительными. Верхний предел расстояния между датчиками определяется требованиями к когерентности между сигналами; поскольку источник является протяженным, по крайней мере при расстоянии от шахты до источника в 100 м (т.е. при расстоянии до источника в 120 м в положении максимального фактора направленности) расстояние между датчиками в 40 м может оказаться слишком большим, Это может служить аргументом в пользу большего возможного расстояния от шахты до датчиков, т.е. от 300 до 500 м.

Вероятность обнаружения, частота ложных сигналов тревоги

Количественная оценка характеристик работы приемника на настоящем этапе затруднительна. При использовании критерия большой амплитуды на близком расстоянии, все запуски ракет, несомненно, будут зарегистрированы. Однако, для того, чтобы провести дискриминацию других потенциальных источников, которые могут вызвать ложную тревогу, следует исключить некоторые события с использованием дополнительных критериев, таких, как временной ход амплитуды и спектральные характеристики (см. следующий раздел), что выходит за пределы обычного рассмотрения кривых характеристик работы приемника. При правильной конструкции кажется возможным приблизить вероятность обнаружения как угодно близко к 1. Что касается сигналов ложной тревоги, хотелось бы достичь значений меньше 1 за много десятков лет. Для того, чтобы достичь этого, надо оценить вероятность того, что гром на расстоянии 1 км, или меньше, приведет к похожему на запуск спектру и профилю амплитуды; предположительно, она будет исключительно малой. Следует исследовать также, может ли реактивный самолет – может быть, выполняя специальный маневр (пикирование, близкий к вертикальному взлет) – сделать то же самое; это также кажется весьма маловероятным.

СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ

Конструкция станции. Кооперативный сейсмический мониторинг и система раннего предупреждения должны обладать следующими характеристиками: на расстоянии 200 – 500 м (для тяжелых ракет, до 1 км) от каждой из 510 американских⁷¹ и 301 российской⁷² шахты размещается решетка из по крайней мере трех вертикально чувствительных сейсмических датчиков на расстоянии 20 – 40 м друг от друга. Датчики закапываются на глубину 0,1 – 1 м и соединяются с расположенной рядом цифровой системой записи и обработки, которая также может быть закопана; последняя соединяется с коммуникационным каналом. На каждой площадке датчиков единственным наземным объектом будет только антенна (спутниковая), может быть, снабженная солнечными батареями, и забором, если это необходимо. Требуется некоторая защита закопанного оборудования (например, следует предотвратить вспашку и раскопки).

Там, где это возможно, датчики не следует размещать на линии с близкой взлетной полосой аэродрома. Они должны располагаться вдали (по крайней мере в 100 м) от дороги. Следует соблюдать значительное расстояние (несколько сотен метров) от деревьев, мачт, и т.п., что может связать вызванное ветром движение с грунтом.

При пиковой скорости грунта до 10^{-2} м/с (см. рис. 11) запуск ракеты создает сильное движение грунта. Для его измерения более подходящими будут акселерометры, а не очень чувствительные сейсмометры или геофоны, где выходной сигнал пропорционален скорости. Если давление звука будет примерно постоянным в диапазоне частот вблизи максимума спектра при запуске (см. рис. 5), скорость грунта также будет постоянной. Поскольку ускорение является производной скорости по времени, в этом случае акселерометры будут показывать сигнал, увеличивающийся с частотой. Предполагая 100 Гц как типичную верхнюю частоту, максимальное ускорение может достичь нескольких м/с².

Записываемый динамический диапазон зависит от требований к чувствительности фона. У скорости грунта ожидаемые сильнейшие пики для минимального предлагаемого расстояния в 100 м при звуковом давлении в 2 кПа ($6 \cdot 300$ Па для тяжелой ракеты, см. рис. 11), что соответствует скорости грунта в 0,02 м/с для стандартного фактора передачи 10^{-5} м/(с Па). Если одновременно должен быть разрешаться сейсмический фон, то шаг оцифровки должен быть порядка 10^{-7} м/с, и поэтому динамический диапазон должен быть равен $2 \cdot 10^5$, что соответствует 106 дБ или 19 битам биполярного линейного разрешения⁷³. При умножении на $2\pi f$ для ускорения, в худшем случае основная частота фона f будет равна 1 Гц, в то время как сигнал все еще будет сильным на частоте 100 Гц – увеличивая динамический диапазон на фактор 100, или, добавляя 6,6 бита к разрешению, увеличивая его до 25 бит (в 1 км от шахты все значения будут меньше в 10 раз, что соответствует – 20дБ, или 3,3 бита). Другой подход состоит в том, чтобы не заботиться о фоне и любом сигнале, меньшему по амплитуде в 1000 раз (60 дБ), что соответствует разрешению в 11 бит. При этом будут отфильтрованы практически все сигналы малой амплитуды, которые появляются регулярно, но имеют отношения к запуску. Практически все время станция датчиков будет регистрировать и передавать нулевой сигнал⁷⁴. Однако, можно захотеть лучшего разрешения для проверки функционирования датчика и записи фоновой амплитуды, усредненной, скажем, за одну минуту, один час, или один день, что даст полезную информацию о системе. Конечно, это должно быть сбалансировано с требованиями секретности в отношении операций на базе.

⁷¹ В конце 2004 года, было развернуто 500 Минитменов-III и 10 Пискиперов, последние должны быть сняты с дежурства в октябре 2005 года. R. S. Norris, H.M. Kristensen, "U. S. nuclear forces, 2005, NRDC Nuclear Notebook." *Bulletin of the Atomic Scientists* 61 (1) (Jan./Feb. 2005): 73–75.

⁷² В 2004 году, количество размещенных в шахтах МБР было таким: 120 SS-18, 130 SS-19, 15 SS-24 M1, 36 SS-27 (и было 312 SS-25 МБР дорожного базирования). R. S. Norris and H. M. Kristensen, "Russian Nuclear Forces 2004, NRDC Nuclear Notebook." *Bulletin of the Atomic Scientists* 60 (4) (July/Aug. 2004): 72–74.

⁷³ Экстремальные значения были удвоены, поскольку они могут быть как положительными, так и отрицательными: $\text{Id}(4 \cdot 10^5) = \ln(4 \cdot 10^5)/\ln 2 = 18,6$.

⁷⁴ Может быть медленно меняющееся постоянное смещение в 1 или 2 бита.

Для оценки того, что определяет максимум спектра, высокочастотное обрезание должно проводиться на частоте 300 Гц, или около этого (см. рис. 5, где максимум находится на частоте 30 – 40 Гц). По условию Найквиста с некоторым запасом потребуется частота опроса в 1 кГц для каждого канала, что не является критичным для современных цифровых систем.

Обработка и запись сигнала. Блок обработки должен выполнять следующее: непрерывный мониторинг амплитуды сигнала, расчет, запись и передачу среднеквадратичных значений. Когда одна из амплитуд превысит порог тревоги, установленный примерно на 1/10 величины ожидаемого максимального сигнала от запуска, генерируется событие, все сигналы (включая отрезки в 10 с до и после события, с использованием кольцевых буферов) сохраняются и обрабатываются для распознавания типа события.

Запуск ракеты можно будет распознать по следующим критериям: плавному (более или менее) увеличению и последующему уменьшению амплитуды сигнала с максимальным среднеквадратичным значением и продолжительностью между точками половины максимума, соответствующим типу ракеты и расстоянию от датчика до шахты (максимально 100 – 500 Па на 100 м, 10 – 50 Па на 1 км – точное значение не важно, продолжительность около 3 с на 100 м, 5 – 10 с на 1 км). Расчетные спектры (исправленные на частотную зависимость фактора акустико-сейсмической передачи) являются широкополосными, с одним широким максимумом при нескольких десятках герц. Временной ход азимута и наклона, определенный решеткой датчиков, должен соответствовать источнику, стартующему из шахты и ускоряющемуся по вертикали. На современных быстрых компьютерах обработка займет не более нескольких секунд, так что информация будет доступна для передачи через 20 – 30 с после начала запуска.

Если характеристики не будут удовлетворять запуску, то событие следует классифицировать с использованием подходящих критериев временного хода и формы спектра (частично упомянутым ранее) по категориям: сверхзвуковой реактивный самолет, дозвуковой реактивный самолет, винтовой самолет, вертолет, тяжелое наземное транспортное средство, гром, и прочее. Вероятно, что со временем категория «прочего» потребует дополнительных исследований, и возможно, введения новых категорий (комбайн фермера, землетрясение?).

При пороге амплитуды в 1/10 от максимума для запуска события будут возникать очень редко – вероятно, реже, чем один раз в месяц. Непрерывное функционирование станции датчиков может подтверждаться, с одной стороны, передачей аутентичных кодов после самопроверки через регулярные интервалы – около одной минуты – и, с другой стороны, передачей суммарной информации о действительных среднеквадратичных значениях.

Характеристики всех событий должны не только передаваться, но и сохраняться в журнале. Сырые данные о самых последних событиях также должны сохраняться. Кроме того, следует хранить среднеквадратичные значения для разумного периода времени. Все три типа информации должны повторно передаваться по запросу.

Калибровка. После того, как сейсмические датчики будут закопаны, и станция настроена, следует оценить фактор акустико-сейсмической передачи k с помощью микрофонов на уровне земли и калиброванного источника звука. Поскольку отклик грунта будет линейным до амплитуд при запуске, этот источник может быть намного более слабым. Чисто локальные эффекты можно будет учесть излучающим белый шум близким громкоговорителем; возбуждение синхронных релеевских волн может быть исследовано при помощи небольшого взрыва (фейерверка), взрываемого на расстоянии около 100 м от шахты, желательно при разных углах возвышения⁷⁵. Поскольку ожидаются некоторые вариации акустической амплитуды и фактора передачи из-за погоды (ветра, воды в грунте, снега) точность в 10 – 20% будет достаточной.

Связь. Коммуникационный канал с центром раннего предупреждения другой стороны должен быть независим от национальной коммуникационной сети. Вероятно, один спутниковый канал для каждой площадки датчиков будет наилучшим выбором с точки зрения стоимости, внедрения, и отсутствия помех; установка направленного радиоканала или кабельной сети на ракетной базе с протяженностью в сотни километров с одной или несколькими центральными станциями может оказаться более дорогой. Коммуникационная сеть должна быть безопасной, с аутентичными, и, возможно, зашифрованными сообщениями. Она может следовать примерам, разработанным в американско-российских кооперативных программах по

⁷⁵ Для примера горизонтального распространения см. рис. 4.11 в Kaiser (ссылка 65).

защите, контролю, и учету материалов⁷⁶.

Обман. В то время как система с применением микрофонов легко может быть заглушена громкоговорителями, расположенными в непосредственной близости, привести грунт в движение, в особенности с широкополосным спектром, не так просто. Мотива для имитации запуска ракеты не должно быть, поскольку это может привести к очень опасным последствиям. В принципе можно постараться компенсировать вызванное запуском движение грунта, возбуждив его в противоположной локальной фазе. Вероятно, для каждого датчика один вибратор (или, может быть, мощный громкоговоритель в замкнутой камере, покрытой десятками квадратных метров грунта). Подготовка должна будет проявиться в нерегулярных сильных сигналах, если такие источники будут приближены к площадкам датчиков. Кроме того, возбуждение одного датчика может привести к компонентам на ближайших датчиках, которые не будут проявляться при одном сильном источнике на расстоянии. В качестве дополнительной предосторожности, можно будет разместить датчик на значительно большей глубине (10 м или более), что потребует возбуждения на еще большей площади для того, чтобы достичь уровня сигнала от запуска. Здесь, однако, потребуется некоторое дополнительное количественное исследование.

Обрыв коммуникационного канала будет немедленно обнаружен, если будут использоваться периодические аутентичные сигналы. Выкапывание датчиков произведет нерегулярные сильные сигналы, которые вызовут запрос инспекции.

Датчики, стоимость. В качестве датчиков рекомендуются акселерометры. Одним из возможных типов является Episensor ES-U (одноосный) или ES-T (трехосный) компании Kinometrics (США) с шириной полосы от 0 до 200 Гц и динамическим диапазоном 140 и 155 дБ соответственно. Стоимость датчиков соответственно равна 1400 и 3700 долларов. Та же фирма предлагает маломощный блок оцифровки и обработки Q 330 с АЦП разрешением 24 бита с последовательной телеметрией и соединением с сетью TCP/IP; в шестиканальном варианте он стоит около 9 600 долларов⁷⁷. Максимальная переключаемая частота опроса равна 200 Гц (максимальная частота сигнала ниже 100 Гц), и, однако, не оптимальна. Может быть, она будет увеличена до 0,5 кГц для упомянутых датчиков, или до 1 кГц для датчиков с частотой обрезания 400 Гц, при потере нескольких битов разрешения. Поскольку основная спектральная мощность шума расположена ниже 100 Гц, не исключено, что можно будет работать с частотой обрезания в 100 Гц, для того, чтобы использовать имеющееся коммерческое оборудование. В этом случае максимум спектра будет менее выраженным, что потребует некоторого изменения критерия спектральной формы.

С тремя датчиками, одним устройством оцифровки и обработки, кабелями, и источником питания, стоимость одной регистрирующей станции будет равна примерно 20 000 долларов; добавив стоимость коммуникационного канала, установки и программного обеспечения, общая стоимость для одной площадки, вероятно, будет меньше 50 000 долларов.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Решетка из трех сейсмических датчиков ускорения, закопанных на небольшой глубине под поверхностью в нескольких сотнях метров от шахты МБР может надежно обнаружить запуск ракеты и отделить его от других событий, которые вызывают сильные смещения грунта. Одна такая решетка вместе с безопасным коммуникационным каналом к центру раннего предупреждения другой стороны должна быть установлена на каждой шахте МБР в странах-партнерах.

Первые станции могут быть установлены сравнительно быстро. Реальное проектирование может быть начато немедленно, с учетом результатов некоторых более конкретных исследований, которые могут производиться параллельно. Такая работа может быть проведе-

⁷⁶ Здесь Национальная лаборатория Сандия (США) сотрудничала с российским Курчатовским институтом и лабораторией ядерного оружия Арзамас-16, с основным финансированием от Министерства энергетики США для разработки систем дистанционного мониторинга ядерных материалов, Mosher et al. (ссылка 5), глава 4, вариант 2. См. также "Russia: DOE MPC&A Program," [<http://www.nti.org/db/nis/profs/russia/forasst/doe/mpca.htm>](Feb. 24, 2005).

⁷⁷ [<http://www.kinometrics.com>]; цены предоставлены по электронной почте летом 2004 года.

на в следующих областях⁷⁸:

- Расчет акустического распространения с помощью сложных программ, которые включают влияние атмосферы, такое, как рефракцию и отражение от пористого грунта, в частности, могут быть проведены наилучшие ситуации ветрового сдвига⁷⁹. Могут оказаться полезными подробные модели шума от факела⁸⁰.
- Определение наилучшего размера решетки для заданного состояния грунта и расстояния от шахты до датчиков. Исследование возможности заметного улучшения возможности дискриминации при включении трехмерного движения грунта.
- Анализ возможности имитации похожих на запуск сейсмических сигналов от других источников (например, летящего по особой траектории реактивного самолета), и, если таковые будут, изобретение методов их дискриминации.
- Оценка вероятности того, что гром вызывает сигнал, аналогичный сигналу от запуска.
- Исследование потенциала подавления акустического или сейсмического сигнала от каждого датчика, и, при необходимости, разработка мер противодействия.
- Проверка движения грунта, вызываемого спутниковой антенной, солнечными панелями, или забором, при сильном ветре, и, при необходимости, способы его уменьшения.

После нескольких месяцев проектирования, выбора компонентов материальной части и программного обеспечения, и написания программ для обработки сигналов и дискриминации источников, испытательные станции должны быть установлены у нескольких шахт, а также на площадках для испытания ракет. У шахт можно будет собрать информацию о фоне в течение года, во время различных погодных условий. На площадках для испытаний можно будет проверить алгоритмы распознавания запуска. В обоих случаях будет испытана обработка сигнала и коммуникационные каналы.

После одного или двух лет, конструкция может быть улучшена и станции могут быть установлены на всех шахтах, вместе с установкой центров раннего предупреждения. Аналогичные системы могут быть установлены в других ядерных державах. Если опыт с системами на шахтах окажется положительным, то можно будет начать рассматривать включение мобильных МБР. Здесь задача будет заключаться в надежном обнаружении запуска без предварительного знания расположения пусковых установок. Акустико-сейсмическое обнаружение будет работать, если носители будут ограничены районами запуска, которые должны быть покрыты сетью датчиков через каждые 1 – 2 км, обеспечивая, чтобы чувствительность была достаточной только для обнаружения носителя на расстоянии менее 50 – 100 м. Границы областей можно будет наблюдать с помощью чувствительных к носителям сейсмических датчиков, расположенных на расстоянии около 100 м⁸¹. Более простые и дешевые, но также и более внедренные, системы могут быть альтернативой датчикам запуска (контактные выключатели, инфракрасные датчики, и т.д.) на носителях, которые могут сообщаться только после возвращения в гарнизон, если только не произошло запуска⁸².

Это не касается проблемы запусков баллистических ракет с подводных лодок, которые становятся все более точными и могут иметь короткие времена подлета с передовых позиций. Из-за огромных пространств океанов и морей и сложности подводных датчиков, покрытие гидроакустическими датчиками непрактично. Аналогично мобильных МБР, на подводных лодках можно будет установить печати с датчиками; при открытии люков ракет, или другой подготовке к запуску, на поверхность могут быть выпущены буи, которые (как в концепции мониторинга возвращения подлодок с передовых позиций⁸³) потом могут передать инфор-

⁷⁸ Исследование должно также рассмотреть альтернативный метод регистрации инфразвукового излучения на малых расстояниях и сравнить относительные достоинства.

⁷⁹ Одна такая программа разрабатывалась по контракту с ВВС США: M. J. White, Development of a Predictive Model for Rocket Launch Noise Footprint, Report for Air Force Research Laboratory, Littleton CO: Applied Research Associates, Nov. 27, 2000 (NTIS, AD-A384 661) (к сожалению, попытки получить доступ к этой программе оказались безуспешными).

⁸⁰ См., например, программу, разработанную в НАСА: "Computer Program Predicts Rocket Noise," NASA Tech Briefs (Feb. 2001), [<http://www.nasatech.com/Briefs/Feb01/KSC12061.html>] (July 14, 2003) (однако, доступ ограничен гражданами США и постоянными резидентами).

⁸¹ Altmann (ссылка 65).

⁸² Mosher et al. (ссылка 5): глава 4, вариант 8.

⁸³ Mosher et al. (ссылка 5): глава 4, вариант 4, подход 2.

мацию на спутники. Соглашения по таким системам будет трудно достичь⁸⁴.

Поскольку положения шахт фиксированы и хорошо известны, кооперативный мониторинг их гораздо легче обговорить, в особенности, если датчики будут располагаться на некотором расстоянии, как рекомендуется здесь. Расходы будут очень невелики. Стоимость станции на шахте (около 50 000 долларов) намного меньше стоимости ракеты (десятки миллионов долларов), и, конечно, еще намного меньше, чем ущерб, который может вызвать ракета (до сотен миллиардов долларов, не говоря о жизнях). Вся система примерно для 500 американских шахт и 300 российских шахт будет стоить около 40 миллионов долларов. Это предпочтительно в сравнении с запуском уже изготовленных российских спутников раннего предупреждения, которые оцениваются бюджетным управлением Конгресса в 160 миллионов долларов⁸⁵. С 800 станциями система будет иметь вдвое больше датчиков по сравнению с международной системой мониторинга, которую эксплуатирует временный технический секретариат организации договора по всеобщему запрещению ядерных испытаний в Вене⁸⁶. В отличие от последнего, в системе раннего предупреждения используется только один тип датчиков и она сконцентрирована только на очень небольших областях, которые контролируются датчиками на площадке. Поэтому вопрос изучения подозрительных событий проще на порядки величины. Соответственно, требования к персоналу и эксплуатационные расходы системы и двух (совместных или отдельных центров) должны быть намного меньше (в 2003 году персонал системы составлял 270 человек, а бюджет равнялся 90 миллионам долларов, в том числе 30 миллионов долларов на строительство системы мониторинга⁸⁷).

Кооперативная акустико-сейсмическая система раннего предупреждения не должна рассматриваться как замена спутников и космических радаров. Напротив, она должна дополнять их, предоставляя дополнительный канал проверки того, действительно ли началась атака, если одна из систем даст подозрительные указания. Предоставляя дополнительную надежную информацию о том, что запуска не произошло, и в кооперации с другими системами, акустико-сейсмический мониторинг шахт МБР может построить доверие, которое может привести к расширению на другие баллистические ракеты и может облегчить дальнейшие ядерные сокращения в будущем.

⁸⁴ Mosher et al. (ссылка 5): глава 4, вариант 8.

⁸⁵ G. Forden, "Letter to the Honorable Tom Daschle on Further Options to Improve Russia's Access to Early-Warning Information", Washington DC: CBO, Sept. 3, 1998, цитируется в Mosher et al. (ссылка 5), p. 46–47. Эти спутники на высокоэллиптических орбитах будут функционировать только в течение трех лет.

⁸⁶ [<http://www.ctbto.org>], Verification Regime, Overview (Feb. 24, 2005).

⁸⁷ Annual Report 2003, CTBTO Preparatory Commission, Vienna (2004), Ch. 7, [<http://www.ctbto.org/reference/annualreport/ar-2003-mp7.pdf>] (Feb. 24, 2005).